



HAL
open science

Mise en place et évaluation prospective d'un programme de formation à l'arthroscopie du genou sur un simulateur de réalité virtuelle

Lucas Azzolin

► To cite this version:

Lucas Azzolin. Mise en place et évaluation prospective d'un programme de formation à l'arthroscopie du genou sur un simulateur de réalité virtuelle . Médecine humaine et pathologie. 2017. dumas-01667946

HAL Id: dumas-01667946

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01667946>

Submitted on 19 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mise en place et évaluation prospective d'un programme de formation à l'arthroscopie du genou sur un simulateur de réalité virtuelle

Lucas Azzolin

► **To cite this version:**

Lucas Azzolin. Mise en place et évaluation prospective d'un programme de formation à l'arthroscopie du genou sur un simulateur de réalité virtuelle . Médecine humaine et pathologie. 2017. <dumas-01667946>

HAL Id: dumas-01667946

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01667946>

Submitted on 19 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement le 11 octobre 2017

Par
LUCAS AZZOLIN

MISE EN PLACE ET ÉVALUATION PROSPECTIVE D'UN PROGRAMME DE FORMATION À L'ARTHROSCOPIE DU GENOU SUR UN SIMULATEUR DE RÉALITÉ VIRTUELLE

DIRECTEUR DE THÈSE

Monsieur Thomas THELEN

MEMBRES DU JURY

Monsieur le Professeur Thierry FABRE / **Président**

Monsieur le Professeur Jean-Luc PELLEGRIN / **Juge**

Monsieur le Professeur Dominique CHAUVEAUX / **Juge**

Monsieur le Docteur Yan LEFEVRE / **Juge**

Monsieur le Docteur Thomas THELEN / **Juge**

RAPPORTEUR DE THÈSE

Monsieur le professeur Dominique CHAUVEAUX

REMERCIEMENTS

A notre Président du Jury -

Monsieur le Professeur Thierry FABRE

Professeur des universités-Praticien hospitalier

Chef de service de chirurgie orthopédique et traumatologique

Unité d'orthopédie et traumatologie périphérique,

CHU de Bordeaux

Merci de votre accueil dans votre service et de votre confiance. J'ai pu apprécier l'étendue de vos connaissances, une remise en question permanente et une volonté de toujours avancer. Je suis sensible à l'honneur que vous me faites de présider cette thèse, veuillez y trouver l'expression de mon profond respect.

A mon Directeur de thèse -

Monsieur le docteur Thomas THELEN

Chef de clinique en orthopédie et traumatologie

Unité d'orthopédie et traumatologie périphérique,

CHU de Bordeaux

Merci Thomas de m'avoir guidé pour ce travail. Tes conseils avisés et ta disponibilité m'ont été d'une aide précieuse. J'admire tes compétences chirurgicales et ton attitude irréprochable, qui donne une belle image de l'orthopédie aux plus jeunes. Je te souhaite le meilleur pour la suite. Trouve ici mon profond respect et mon amitié.

A mon Rapporteur -

Monsieur le Professeur Dominique CHAUVEAUX

Professeur des universités-Praticien hospitalier

Ancien chef de service de chirurgie orthopédique et traumatologique

Unité d'orthopédie et traumatologie périphérique,

CHU de Bordeaux

Merci de votre gentillesse et de votre grande bienveillance envers vos internes. Vos qualités humaines et relationnelles sont hors-normes. Ce travail n'aurait pas été possible sans vous, soyez assuré de toute ma gratitude et de mon profond respect.

A mes Juges -

Monsieur le professeur Jean-Luc PELLEGRIN

Professeur de médecine interne

Chef de Pôle de médecine interne du CHU de Bordeaux

Directeur du Collège Science de la santé de l'Université
Bordeaux

Je suis très honoré que vous ayez accepté de juger ce travail, réalisé grâce à votre intérêt et à votre implication dans la mise en place de la simulation et particulièrement de l'enseignement par la réalité virtuelle. En espérant que vous trouverez dans ce projet, les premiers fruits de votre engagement pour le développement de ce nouveau mode de formation au sein de notre université. Recevez, ici, l'expression de mon profond respect et de ma gratitude.

Monsieur le Docteur Yan LEFEVRE -

Praticien Hospitalier de chirurgie orthopédique

Service de chirurgie infantile, CHU de Bordeaux

Ta culture de la chirurgie, ta patience, ton accompagnement et ta gentillesse sont des qualités qui font de toi un maître exemplaire. Tu as marqué ma formation et je n'oublierai jamais ce précieux bagage pour prendre soin des enfants.

Trouve dans ce travail mon amitié et mon profond respect.

A mes maîtres d'internat -

Monsieur le Professeur Jean Charles LE HUEC

Monsieur le Docteur Henry DURAFFOUR

Monsieur le Docteur Eric HAMMEL

Monsieur le Docteur Stéphane AUNOBLE

Monsieur le Docteur Yann WIART

Monsieur le Docteur Julien ABAD

Monsieur le Docteur Bruno ZIPOLI

Monsieur le Docteur Alfonso RIOJAS

Madame le Docteur Anne CERNIER

Monsieur le Docteur Gaël LEDOYER

Monsieur le Docteur Antonio MINNITI

Monsieur le Docteur Mohamed FAIK

Monsieur le Docteur Vincent SOUILLAC

Madame le Docteur Marie-Laure ABI-CHAHLA

Monsieur le Docteur Olivier LAFFENETRE

Monsieur le Docteur Julien LUCAS Y HERNANDEZ
Monsieur le Docteur Abdelfettah LALIOUI
Monsieur le Docteur Jean-Roger PONTALLIER
Monsieur le Docteur Francis VALLIER
Monsieur le Docteur Jean-Pierre MARCHALAND
Monsieur le Docteur Jean-Marie KALAMBO
Monsieur le Docteur Stéphane COSTES
Monsieur le Docteur Eric LASSEUR
Monsieur le Docteur Prakash DINDOYAL
Monsieur le Docteur Bertrand DUNET

A mes chefs -

Au Docteur Benoît CHABERT
Au Docteur Hugue DEMEZON
Au Docteur Charles RIVIERE
Au Docteur Rafael DE BARTOLO : pour ton amitié et Boom !
Au Docteur Thibault MASQUEFA
Au Docteur Jeremy KNAFO
Au Docteur Alexandra ERBLAND : notre Dame Erbland
Au Docteur Eloïse AUQUE
Au Docteur Frédéric SIBILLA
Au Docteur Audrey ANGELLIAUME
Aux Docteurs Clément RIBES (Bousta), Paul CREMER (Paulo),
Morgane VARGAS (MoMo), Geoffrey RECANATI (Mon Geoff !),
Déborah ROYAUX, Nicolas VERDIER pour votre amitié, votre
confiance et votre compagnonnage.

A mes cointernes -

Edouard HARLY, Antoine FOURGEAUX : doudou et la Fourge
pour ce trio de folie, ces débuts sont de très bons souvenirs.
Antoine HERON : à ton amitié mon potiron
Jean-Etienne CASTELAIN : LE JET pour ton compagnonnage
tant apprécié.
A Souf, Wendy, Marion, Alison, Mailys Bergère, Cadennos, Jean
Fi, Hélène, Soline, Pépite, Pierre C., Paul L., Matthieu G le vien-
nois, Johan, Julien Vignou, Paul Maxime, Mosh, Mathias, Vincent
« chacha », Gabriel, Anthony P., Arthur, Arnaud et aux autres
soldats de l'orthopédie Bordelaise...

A ma famille -

A Caroline, après ce rally du commencement, toutes ces aventures nous ont mélangés, alors même si à deux on va plus loin, pour moi on va aussi plus vite, je te remercie pour tous ces merveilleux moments, à notre Equipe...

A mes parents, le noyau dur de mon existence.

A ma mère Marie Laure, pour ton soutien sans faille et tout l'amour que tu m'as donné, tu as fait tout ce que je suis.

A mon père Marc, à tous nos moments partagés et notre complicité. Tu es mon modèle de philosophie positive.

A ma petite sœur Julia, merci de ton aide, tu es absolument tout ce dont un frère peut rêver.

A ma grand mère Jacqueline, ma petite mamie, notre mémoire et notre encyclopédie.

A Isabelle, ton ti zenfan zoreil i aim a ou.

Aux Minato : Philippe, Bernadette et Ludovic, Monica merci pour votre accueil, votre gentillesse et votre soutien, c'est toujours un plaisir de venir passer des moments avec vous.

A mes amis -

A Philippe Ariès : mon team d'Elite indestructible, à jamais mon ami.

A Sylvain : Mon avant préféré, mon ami à tous nos projets !

A Rémi, Cyril, Clément, Romain, Mathilde, Anne Emma, Lolita, mes belles amitiés pour tous nos bons moments passés mais aussi à venir, votre présence à nos côtés, votre gentillesse et votre fidélité sont précieuses.

Mes amis Réunionnais : Anthony, Quentin « QD l'enfant terrible », Alex « soso », « Mc Jetlumi » Charlie, Kevin « Cro », Laura « kats », Valou, Jasmine « mimin », Pierre « Sagrada », Diane, Cécile, Meï, Raphael, François et Alex, Alizée, Charles « Despo », Céline, Dimitri « Taytay », Robin, Mathieu « Matie », Quentin et Vincent et tous les autres...

Gitou & Aurélie, Léa & Thibault, Marie & Floflo, Zaza & Val pour ces merveilleux moments et voyages qui nouent des liens.

A Ronan et Eric.

Aux participants de ce travail -

André, merci pour ta disponibilité et ton aide précieuse.

Merci aux externes, sérieux, impliqués, très sympathiques : Manon, Alexandra, Marion, Laurie, Alexandre et Clément.

Merci à mon statisticien Vincent D. pour ta sympathie, ta disponibilité.

Isabel et Martina pour le soutien logistique et l'expertise dans la simulation.

Merci à monsieur le Professeur Salamon pour son accueil et ses conseils.

Merci à Marie-Laure et Caroline, mes « revieweuses ».

Merci à Julia pour la belle mise en page.

« Croire en quelque chose et ne pas le vivre, c'est malhonnête »

Ghandi

Ce travail est organisé sous la forme d'un rappel général préalable suivi d'un article qui sera soumis à publication.

SOMMAIRE

MISE EN PLACE ET ÉVALUATION PROSPECTIVE D'UN PROGRAMME DE FORMATION À L'ARTHROSCOPIE DU GENOU SUR UN SIMULATEUR DE RÉALITÉ VIRTUELLE

1/PRÉFACE.....	11
2/RAPPEL DE CONNAISSANCES.....	12
1 - HISTOIRE DE L'ARTHROSCOPIE.....	12
2 - LA SIMULATION MÉDICALE.....	13
3 - UN CONTEXTE ET UNE DISCIPLINE PROPICE À LA SIMULATION.....	15
4 - LE TRÉPIED DE LA FORMATION SUR SIMULATEUR.....	19
LE SIMULATEUR.....	19
LE PROGRAMME.....	28
LE FORMATEUR.....	35
5 - LA SIMULATION A FAIT SES PREUVES DANS LA LITTÉRATURE.....	38
2/ MISE EN PLACE & ÉVALUATION PROSPECTIVE D'UN PROGRAMME DE FORMATION BORDELAIS À L'ARTHROSCOPIE DU GENOU SUR SIMULATEUR DE RÉALITÉ VIRTUELLE.....	42
RÉSUMÉ.....	42
INTRODUCTION.....	43
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	45
SUJETS.....	45
SIMULATEUR.....	45
PROGRAMME.....	46
ÉVALUATIONS.....	47
L'ANALYSE STATISTIQUE.....	49
RÉSULTATS.....	49
DISCUSSION.....	53
CONCLUSION.....	59
3/ PROPOSITIONS.....	59
4/ CONCLUSION.....	61
5/ BIBLIOGRAPHIE.....	62

1/ PRÉFACE

Suivant l'évolution du monde, l'apprentissage de la chirurgie se transforme. A l'image d'autres métiers à risque, où les erreurs sont synonymes de graves conséquences, la chirurgie, pour les prévenir, se trouve confrontée à l'obligation d'intégrer la simulation dans sa formation.

Les progrès technologiques ont permis la mise au point de simulateurs de réalité virtuelle très performants, autorisant un entraînement efficace dans de nombreuses chirurgies mini invasives, comme l'arthroscopie.

L'acceptation et l'intégration de ce nouveau moyen d'apprentissage est un véritable défi, notamment en France.

Le but de ce travail a été de s'inspirer de la littérature pour créer un programme de formation à l'arthroscopie du genou sur un simulateur de réalité virtuelle haute fidélité, de l'appliquer puis de l'évaluer afin de proposer des améliorations.

2/ RAPPEL DE CONNAISSANCES

1 - HISTOIRE DE L'ARTHROSCOPIE

Cela fait maintenant presque un siècle que les chirurgiens ont commencé à développer une méthode mini invasive pour explorer les articulations « fermées ». (1)

En 1918 au Japon, Kenji Takagi tente d'explorer le genou de cadavre avec un cystoscope. En 1920, il invente « l'arthroscope » et réussit enfin à explorer une articulation cadavérique. Il perfectionne son instrument pour pouvoir l'appliquer en clinique, c'est donc en 1931 que naît l'arthroscope n°1 (2). Dès lors les évolutions successives de ce modèle artisanal permettront de prendre des photos intra articulaires en noir et blanc puis en couleur dès 1936.

Par la suite, son élève Masaki Watanabe crée en 1967 le premier arthroscope à fibre optique : l'arthroscope 21 (3). Devenant ainsi le véritable père de l'arthroscopie moderne, avec ce modèle créé en série qui permet enfin une exploration précise et efficace (4).

Ce n'est que vers les années 70 que l'arthroscopie s'étend au reste du monde avec entre autres les publications de Jackson (5), Casscells (6).

Les perspectives de l'arthroscopie thérapeutique se développent avec l'apparition d'une instrumentation spécifique notamment grâce à O'Connor aux Etats Unis 1977 (7).

Bien que le genou soit la source des travaux originels, l'arthroscopie s'étend rapidement aux autres articulations comme en témoignent les ouvrages de Watanabe : *Arthroscopy of small joints* (Orthop Surg 1971) ou encore *Atlas of arthroscopy* 3e édition (Ed Tokyo 1978).

Dès lors, l'arthroscopie connaît une véritable explosion avec l'apparition de l'optique angulée et surtout des caméras miniatures qui révèlent cet art et permettent la transmission du savoir. Le premier cours d'arthroscopie a lieu en mai 1973, puis est formée la société internationale d'arthroscopie en 1974 (IAA)

avec comme président Watanabe. En 1980 apparaît la fameuse Société Française d'Arthroscopie.

La première revue exclusivement dédiée paraît en 1985 sous le nom Arthroscopy. Rapidement la culture de l'arthroscopie s'étend pour devenir de nos jours une discipline particulière et essentielle de la chirurgie orthopédique. Les applications sont multiples tant dans le genou avec les méniscectomies, sutures méniscales, synovectomies, reconstructions ligamentaires, que dans l'épaule : réparation de coiffes sous arthroscopie, acromioplastie, que dans la hanche avec les conflits fémoro acétabulaires, ou que le coude, le poignet... Les perspectives d'avenir sont prometteuses.

2 - LA SIMULATION MÉDICALE

Depuis des siècles, les médecins et les chirurgiens conçoivent la simulation au sens large comme un outil indispensable au perfectionnement des techniques.

La simulation en médecine est apparue en France, avec la création de L'Académie royale de chirurgie à Paris en 1731, un véritable centre de formation où l'utilisation de cadavres a pris une place importante pour l'enseignement et la pratique.

Une pionnière dans le milieu de la simulation est Angélique du Coudray. Cette célèbre sage femme a créé un réel modèle de simulation en 1758 : « La Machine ». Faite de bois, de carton, tissu et coton, c'est un bassin de femme enceinte grandeur nature qui permet différentes manipulations. Elle sera même approuvée par l'Académie de Chirurgie. C'est avec cette invention que Mme Coudray sillonne la France afin d'initier plus de 5000 sages femmes à l'art de l'accouchement (8).



Figure 1 - « La Machine » de Madame De Coudray.

Depuis, de nombreuses méthodes de simulation se sont développées : la poursuite des travaux sur les cadavres ou les animaux, les os secs, puis plus récemment les simulateurs pour la chirurgie mini invasive.

Avec l'apparition de pratiques mini invasives (Mini Invasive Surgery) telles que la coelioscopie ou l'arthroscopie

pie, nécessitant une gestuelle particulière et techniquement exigeante, la simulation a connu un nouvel essor. En effet la projection d'un espace en 3D sur un écran 2D, la perception profonde par le toucher, la coordination œil main, la triangulation dans l'espace sont des capacités qu'il faut s'approprier afin de devenir un bon arthroscopiste et qui se prêtent tout particulièrement à la simulation.

On voit donc apparaître au travers de publications, vers 1993, une véritable volonté de simuler pour devenir meilleur chirurgien (9). Meyer met en place une boîte noire, utilisable dans des conditions sèches ou humides, qui permet l'apprentissage des bases de l'arthroscopie dans un « environnement contrôlé » ; cet article conclut que ce modèle est rentable et confère une notion de toucher mais ne permet pas de manipulation de membre.

Le développement technologique des ordinateurs et sa démocratisation a beaucoup contribué à l'apparition de la simulation de type réalité virtuelle. Des publications, telles que celle de Ziegler, illustrent parfaitement la collaboration indispensable avec des équipes d'informaticiens et de graphistes (10) afin de mettre au point des simulateurs de qualité, de plus en plus abordables comme par exemple un des premiers simulateurs informatiques pour l'arthroscopie du genou apparu en 1995 (11).

La notion essentielle de haptique (du grec « je touche ») ou Feedback ou encore retour d'information fait son apparition vers 1995 avec les simulateurs virtuels dit « haptiques », permettant d'augmenter considérablement le réalisme et de développer d'autres compétences comme celle de percer les os (12) ! En 1997, un système nommé PHANTOM 3D (13) tente de simuler le toucher intra articulaire et la déformation tissulaire dans l'arthroscopie de genou pour apporter toujours plus de réalisme. Comme nous le verrons plus tard ce feedback paraît absolument capital dans l'apprentissage de l'arthroscopie sur simulateur.



Figure 2 - Phatom 3D prototype de simulateur origine article Gibson 1997 (13).

3 - UN CONTEXTE ET UNE DISCIPLINE PROPICE À LA SIMULATION

Depuis le 16^e siècle, la chirurgie s'est perpétuée par un compagnonnage selon le mode d'enseignement maître/apprenti, désigné par le « see one, do one, teach one » anglo-saxon. C'est d'ailleurs un des seuls domaines connus où les élèves parlent encore « de maître ». Ce modèle est dirigé par un senior et implique directement de vrais patients.

Actuellement l'apprentissage de notre art est en pleine transition. La mondialisation de la chirurgie concourt au développement d'une ère médicale basée sur des preuves (« evidence base medicine ») où de très nombreuses techniques sont référencées et accessibles au monde entier. L'évolution extrêmement rapide de la chirurgie, l'apparition de nouvelles techniques, et d'ancillaires de plus en plus sophistiqués augmentent considérablement la difficulté de l'exercice ainsi que le temps d'apprentissage. L'arthroscopie, vitrine technologique, en illustre parfaitement ce nouvel aspect.

L'arthroscopie, partie intégrante de la chirurgie moderne, a permis de considérablement diminuer l'agressivité de certains gestes chirurgicaux, et offre d'importantes perspectives pour l'avenir. Cependant elle requière une technique exigeante, nécessitant de maîtriser la triangulation, le repérage dans l'espace, la dextérité de la main dominante et de la main non dominante, la coordination œil main à travers une interface qui est un écran 2D, reflet projeté d'une réalité en 3D... Ceci explique une courbe d'apprentissage importante que certains ont tenté de décrire, ainsi Hodgins dans arthroscopy sur une série de plus de 340 arthroscopies diagnostiques de genou a évalué le nombre de procédures moyennes à 16 pour avoir un niveau jugé acceptable (14) confirmée par l'étude de Jackson sur les réparations méniscales (15).

Dans l'enquête réalisée dans notre travail, le nombre moyen d'arthroscopies réalisées par les internes de Bordeaux en tant qu'opérateur principal est de 6 à mi parcours de la formation. D'autres enquêtes montrent que ce sous entraînement est général même aux Etats Unis, pourtant véritable modèle en simu-

lation, où une enquête sur 272 résidents montrent que 68 % jugent leur formation arthroscopique insuffisante (16).

Alvand a parfaitement montré que l'arthroscopie est un domaine particulièrement favorable à la simulation (17) à travers ses caractéristiques : champ de vision limité, petit environnement 3D projeté sur un écran 2D, instruments facilement imitables, gestes en général fins qui n'aboutissent pas à de grosses modifications de l'environnement de simulation (*à la différence d'une simulation d'arthroplastie avec coupes osseuses sur os sec...*), procédures « autonomes » ne nécessitant pas d'aide opératoire.

Par ailleurs, la législation européenne et française, depuis 2015, limite le temps de travail des internes à 48 h par semaine et impose les repos de garde (18). Les effets de ces mesures ont été étudiés aux Etats Unis (19) comme en Europe (20) et font débat sur la qualité de la formation. Les bénéfices retenus sur la qualité de vie, le temps de sommeil et la diminution de la fatigue sont indéniables mais éloignent les internes du bloc opératoire et impacteraient donc négativement leurs compétences chirurgicales et techniques.

La simulation s'impose alors comme une alternative incontournable pour s'exercer malgré ces restrictions, de plus en plus admises. Egan (20) rapporte que 82 % des chirurgiens et internes Irlandais ont utilisé un simulateur et 100 % pensent en utiliser encore.

« *Jamais la première fois sur le patient* »

Rapport de l'HAS sur la simulation en santé

La sécurité des patients est une priorité absolue : aujourd'hui avec le développement de la simulation, s'impose le dogme « **jamais la première fois sur le patient** » (21).

Comme dans l'aviation ou le nucléaire par exemple (21), il n'est plus acceptable de faire des erreurs à priori évitables. Une anesthésie prolongée, ou une erreur technique deviennent de plus en plus difficiles à justifier, surtout dans le contexte médico légal délicat auquel font face les praticiens. Comme le rapporte Madan, dans un article de 2014 (22), il apparaît donc indispensable que les internes aient un niveau minimum avant de pratiquer sur de vrais patients. Ainsi en Suisse, il existe de véritables « permis d'accès au bloc », les jeunes internes doivent compléter une formation sur simulateur de laparoscopie avant d'opérer réelle-

ment.

Ceci est d'autant plus vrai que l'on retrouve dans la littérature des preuves convaincantes de la diminution des erreurs sur les patients par la simulation (23) (24) (25) (26). En chirurgie viscérale, avant-gardiste dans la simulation, une étude randomisée contrôlée sur 13 jeunes internes non expérimentés a montré que le groupe contrôle (formation standard) faisait 3 fois plus d'erreurs et mettait + 58 % du temps durant leurs 10 premières cœlioscopies réelles que le groupe formé sur simulateur (27).

Il faut aussi considérer la pression financière actuelle pour la rentabilité des établissements de santé induisant une diminution des temps des procédures et une optimisation des blocs opératoires. L'américain Farnworth évalue les coûts en comparant les temps d'anesthésie et de chirurgie des internes et des seniors : une procédure de reconstruction du ligament croisé antérieur réalisée par un interne coûte en moyenne 661 dollars de plus que si elle était effectuée par un senior (28). Et ceci ne tient pas compte des échecs de pose de matériel ou des consommables de plus en plus onéreux (vis résorbables ou non, ancrés et autres implants). Il conclut cette étude de 2001 par la nécessité de former les internes avant le bloc opératoire. Bien que coûteux à l'achat (environ 100 000 euros), les simulateurs paraissent une nouvelle fois un moyen intelligent de réaliser des économies en préparant les internes avant la chirurgie et d'augmenter leur efficacité dans les cas *in vivo*. Dès 1993, Satava voyait déjà la simulation comme un gain de temps et d'argent (29).

En arthroscopie l'aide opératoire n'a aucun retour haptique, ce qui ne permet pas d'acquérir de l'expérience dans les sensations « tactiles » dans ce domaine très particulier. Le fait d'assister à des milliers d'arthroscopies ne fait pas forcément de lui un futur bon arthroscopiste tant les sensations sont différentes entre l'opérateur principal et l'aide.

Ajoutons le manque d'opportunités à s'entraîner. Les internes ont besoin de se former à des gestes simples pas forcément communément réalisés dans un centre hospitalo-universitaire très pointu qui recrute des cas souvent plus complexes.

Ainsi au CHU de Bordeaux dans une enquête spécialement réalisée pour cette étude, on compte seulement 103 arthroscopies de genou sur l'année 2016 toutes procédures confondues, pour tous les services. Ce qui fait relativement peu pour un tel centre si l'on rapporte cette activité au nombre de chefs de clinique et d'internes.

Un autre aspect de la formation sur simulateur, est qu'elle mesure directement le niveau de performance minimum et permet une appréciation **objective**. En effet pour la première fois, ce n'est plus le temps (*le nombre de stages ou de procédures vues*) qui sous entend un certain niveau chirurgical mais bien un niveau réel de compétence atteint et **objectivement** mesuré qui compte (30). En outre, ces cas standardisés permettent à chaque participant de se situer **objectivement** par rapport à ses pairs, et d'adapter son entraînement en conséquence.

Cette nouvelle vision de la formation chirurgicale offre de grosses perspectives d'avenir. C'est une vraie volonté d'une école de chirurgie d'amener ses internes jusqu'à un niveau minimum homogène, chaque étudiant aurait également une preuve du niveau de compétence acquis. C'est une assurance de performance, exemple : « dans notre cursus nous livrons de jeunes chirurgiens avec tel niveau de compétences assuré et mesuré voici les chiffres ». Mais c'est aussi une formidable base d'évaluation pour les modifications futures du programme de formation.

« La formation par les méthodes de simulation en santé doit être intégrée dans tous les programmes d'enseignement des professionnels de santé »

Rapport de l'HAS sur la simulation en santé

Comme le résume très bien Atesok dans le JAAOS sur la simulation en orthopédie (31) : Le challenge pour la formation des jeunes est désormais d'apprendre plus de procédures, de plus en plus complexes, avec une courbe d'apprentissage importante en moins de temps . D'où les méthodes d'apprentissage alternatives « hors bloc » telles que la simulation en tout genre : os secs, cadavres, outils softwares, ou simulateur haute fidélité. De plus la simulation permettrait d'augmenter la sécurité des patients tout en diminuant les coûts de la formation pratique. Dans les conclusions et propositions du rapport de l'HAS sur la simulation en santé on lit en proposition numéro 1 :

La formation par les méthodes de simulation en santé doit être intégrée dans tous les programmes d'enseignement des professionnels de santé à toutes les étapes de leur cursus (initial

et continu). Un objectif éthique devient prioritaire : « jamais la première fois sur le patient ».

4 - LE TRÉPIED DE LA FORMATION SUR SIMULATEUR

Pour être intégrée avec succès dans un cursus, la formation sur simulateur doit reposer sur un trépied fondamental : un simulateur, un programme, un formateur.



LE SIMULATEUR

Le simulateur est un outil précieux, il en existe de nombreux types pour l'arthroscopie : des os secs aux ordinateurs ultra performants, très bien analysés dans une revue de la littérature très intéressante de Madan (22).

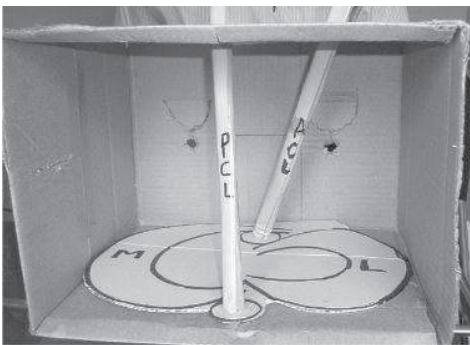


Figure 4 - La boîte d'entraînement de Patil (33) 2009.

« L'ancêtre » de la simulation arthroscopique moderne est la boîte d'entraînement ou « box trainers ». Bien qu'elle ait prouvé une certaine efficacité dans la chirurgie mini invasive notamment en chirurgie laparoscopique (32) l'extrapolation à l'arthroscopie s'avère moins évidente en raison d'un milieu plus restreint, de contraintes différentes... malgré des efforts parfois étonnants de simulation comme le développement de la « black box » permettant d'évoluer dans un milieu sec ou immergé ! (9). Les boîtes sont de fabrication plus ou moins artisanale, permettant aux plus jeunes de se familiariser à la triangulation, à la manipulation de vrais instruments (s'ils sont mis à disposition), et à certaines sensations de toucher. Elles restent une simulation extrêmement sommaire ne permettant pas de créer un environnement immersif fidèle à l'arthroscopie réelle, il n'y pas de retour

d'information sur les performances lors des procédures et elles ne permettent pas la présentation de divers cas ou pathologies spécifiques... L'article de Patil (33) explique le développement d'un simulateur très peu coûteux avec une boîte en carton, une webcam, et des instruments de base d'arthroscopie : il permet une simulation sommaire en triangulation peu coûteux mais avec une réalité nulle, sans feedback, sans variation de pathologie : la photo du simulateur parle d'elle-même. Ces défauts expliquent le manque d'investissement des internes pour ce genre de simulation.

Tableau 1 - Avantages et inconvénients des boîtes d'entraînement

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - prix - accessibilité - transport - pas de risque 	<ul style="list-style-type: none"> - absence total de réalisme - pas de feedback sur les performances - pas de modification des pathologies - peu d'intérêt des internes



Figure 5 - Entraînement à la pose de fixateur sur os sec

Les os secs ou « *sawbones* » et autres articulations plastiques sont un très bon support pour se familiariser et apprendre à manipuler de nouveaux dispositifs tels que plaque, fixateur externe, prothèse, moteur... Selon Van Merrienboer en diversifiant les sources et en offrant un support visuel, les os secs permettent de diminuer la charge externe sur la mémoire (34) et d'augmenter durablement les performances. Leur efficacité est prouvée au travers de nombreuses publications anciennes et récentes (35)(36). Leur application à l'arthroscopie est peu développée dans la littérature même si l'on retrouve quelques articles intéressants comme celui de Butler en 2013 (37). Dans cet essai randomisé contrôlé, 14 étudiants en médecine sans expérience sont randomisés en 2 groupes : un groupe expérimental qui s'entraîne à l'arthroscopie diagnostique sur un modèle sec de genou avant de pratiquer sur cadavre et un groupe contrôle qui pratique directement sur cadavre, les performances ont été mesurées par un score validé (BAKSSS). Le groupe expé-

rimental a divisé par deux le nombre moyen d'essais pour arriver au niveau requis de performance, ainsi que le temps moyen pour démontrer sa compétence.

On peut leur reprocher un manque de réalisme important, une capacité limitée à modéliser l'anatomie physiologique (surtout visuellement), l'absence de variabilité anatomique et de pathologie. Une nécessité de réparation et de maintenance (ménisque à changer dans les méniscectomies par exemple) fait également partie de ses défauts.

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - prix - accessibilité - transport - pas de risque 	<ul style="list-style-type: none"> - manque de réalisme - pas de feedback sur les performances - pas de modification des pathologies - maintenance réparation

Tableau 2 - Avantages et inconvénients des os secs.

La simulation historique offrant le plus de recul reste la pratique sur cadavre. En effet quoi de plus proche qu'un vrai genou humain ? La pratique sur cadavre fait partie du paysage de la chirurgie depuis le XVIe siècle. Ce recul considérable en fait, pour le moment, le gold standard de la simulation d'arthroscopie. Son efficacité paraît tellement logique que finalement assez peu de preuves existent dans la littérature. Une revue de la littérature de 2011 de Gilbody (38) souligne parfaitement cette réalité : « la preuve de l'efficacité des ateliers cadavériques dans la formation chirurgicale est actuellement limitée [...] cependant les stagiaires et formateurs les considèrent beaucoup et estiment qu'ils aident à améliorer les compétences chirurgicales ».

Dès 1999 Grechnig propose un modèle nommé Graz learning pour les résidents qui offre un programme d'entraînement sur les articulations cadavériques de l'épaule, du genou et du poignet (39). Cet article souligne parfaitement les avantages de la pratique sur cadavre : le réalisme maximum, l'utilisation des mêmes instruments qu'au bloc opératoire, mais aussi ses limites.

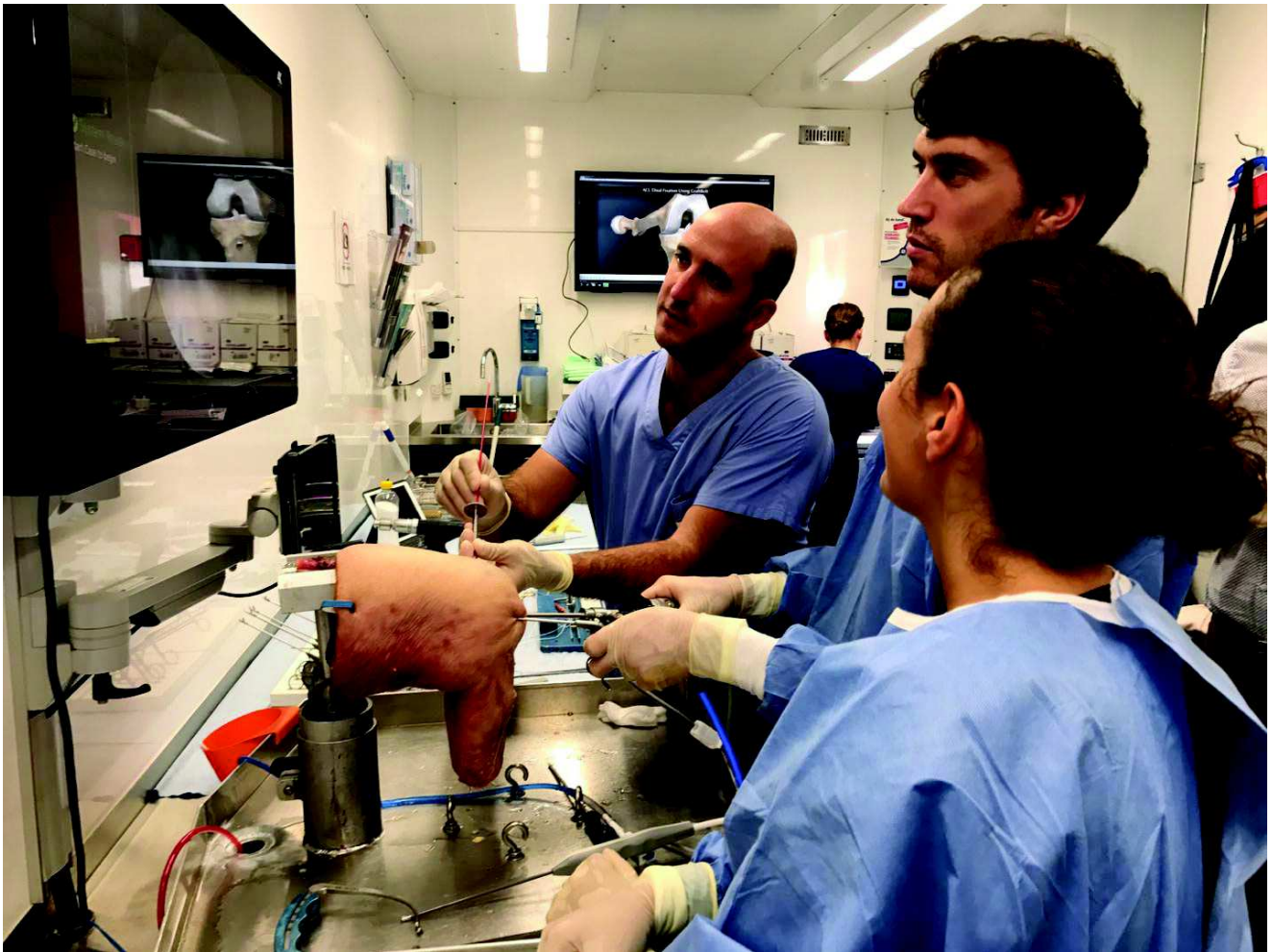


Figure 6 - Cours d'entraînement à l'arthroscopie de genou sur cadavre.

L'énorme logistique entraîne un coût considérable pour un tel programme, ce qui en diminue le nombre de sessions et donc l'accessibilité. On peut y ajouter comme inconvénients : les risques infectieux, l'absence de feedback sur les performances lors des procédures qui nécessite la présence permanente d'un formateur ; l'absence de pathologies ou leur rareté sur les articulations cadavériques, et l'usage unique des corps même si certains ont essayé d'en optimiser au maximum l'utilisation (40).

Certains auteurs ont tenté de contourner en partie ces défauts ; comme dans cet article original de Unalan qui propose un cours de base d'arthroscopie pendant deux jours sur des genoux de bovins, peu cher, sans risque et renouvelable avec un important taux de satisfaction des internes participants (41).

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - réalisme maximum - anatomie réelle - immersion complète - instruments réels - intérêt des internes 	<ul style="list-style-type: none"> - logistique - coûts énormes - pas de pathologies - risques infectieux - un cadavre une session

Tableau 3 - Avantages et inconvénients de l'arthroscopie cadavérique.

Avec les progrès technologiques, des simulations virtuelles sont apparues. Tout d'abord uniquement sur ordinateur qui offre surtout des simulations à visée de planification comme pour les fractures du bassin par exemple (42) (43) ou en combinant le virtuel et les os secs comme dans cette étude randomisée contrôlée pour la pose de prothèse totale de hanche (44). Puis la mise au point de simulateurs de plus en plus performants a permis des expériences toujours plus réalistes et principalement dans le domaine de l'arthroscopie. Ainsi les simulateurs modernes se composent d'une colonne d'arthroscopie, d'un genou factice, d'une caméra et d'instruments contenant de nombreux capteurs, comme des accéléromètres (figure 7). L'image projetée est virtuelle et peut donc présenter un nombre infini de cas et de pathologies différentes aussi rares qu'elles puissent l'être.

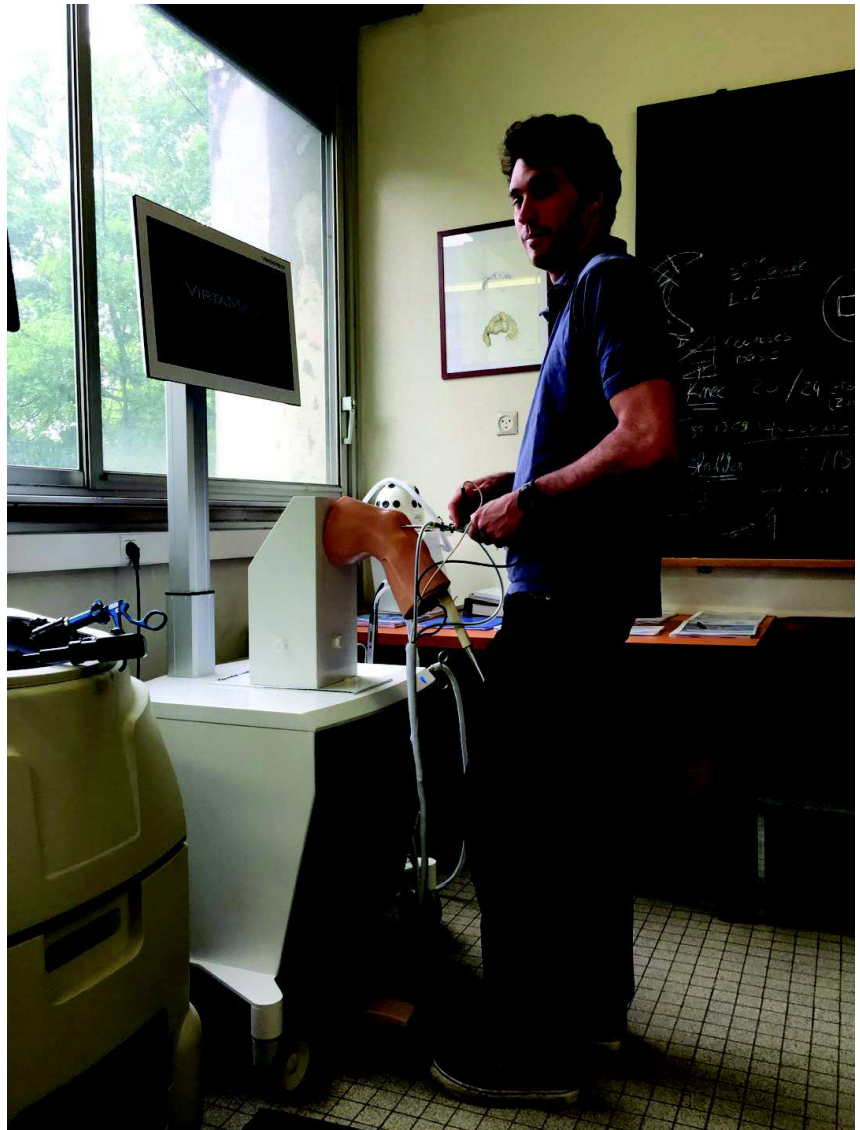


Figure 7 - Un simulateur de réalité virtuelle avec la colonne, le genou, la caméra, les pédales.

Ainsi trois caractéristiques semblent capitales pour les simulateurs de réalité virtuelle basés sur ordinateur : le feedback haptique, la déformation tissulaire, la manipulation du membre (4).

- Le feedback haptique est la sensation de toucher, le fait d'avoir un retour tactile de l'environnement virtuel. Il permet une immersion pour une meilleure expérience d'entraînement. Il existe deux types de feedback haptique : actif avec un système complexe d'analyse des mouvements et un retour mécanique dans les instruments (exemple scanners et haptics de 3D systems) ou passif utilisant les instruments et des obstacles physiques comme c'est le cas avec les simulateurs hybrides (exemple arthroS de virtamed utilisé dans nos travaux : figure 8).

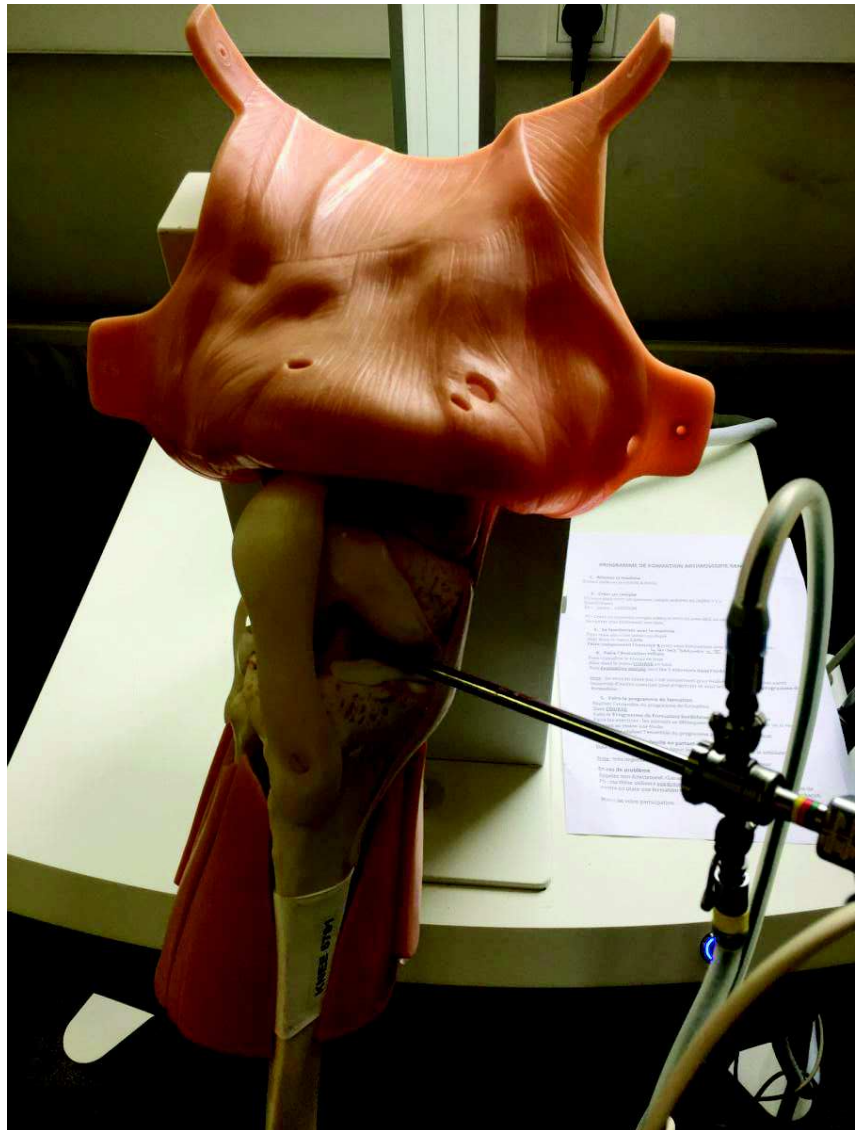


Figure 8 - Exemple de système de Feedback haptique passif pour un simulateur du genou.

- La déformation tissulaire est très difficile à modéliser, elle requière des calculs puissants intégrant à la fois la propriété intrinsèque des tissus et l'interaction instrument/tissus lors des collisions. Elle est indispensable à l'immersion. (13)
- La manipulation du membre pour l'exposition est également un point important. En effet, comme durant les arthroscopies, il est important d'acquérir les notions de valgus, varus forcés et de flexion extension pour explorer correctement les 3 compartiments du genou. Le valgus « ouvre » le compartiment interne, le varus le compartiment externe, et l'articulation fémoro patellaire est exposée en extension. Ceci permet d'augmenter le réalisme mais surtout d'acquérir ces notions d'exposition capitales pour l'arthroscopie du genou (figure 9).

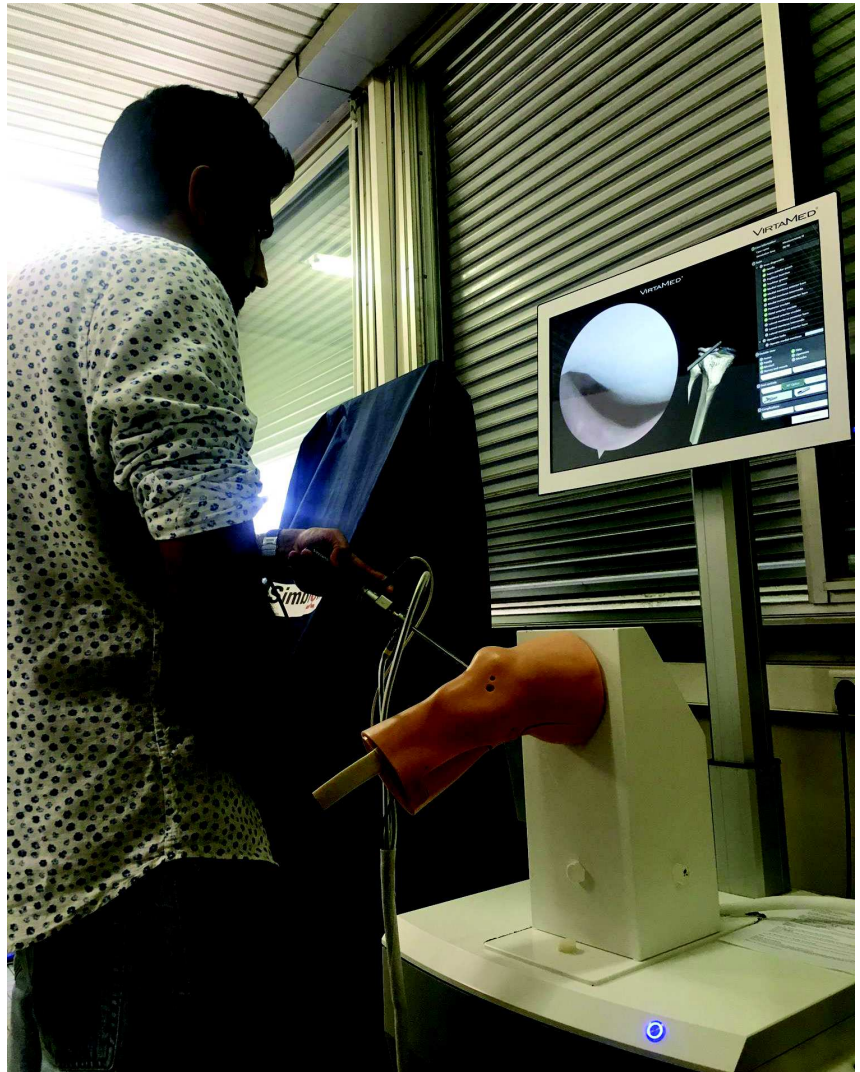


Figure 9 - Exposition du compartiment interne en valgus forcé sur le simulateur.

Ce genre de simulation présente de nombreux avantages :

- Un réalisme important avec un haut degré d'immersion (sonore, visuel, gestuel...), une interaction directe opérateur environnement virtuel, ce qui permet réellement une mise en situation.
- Des procédures reproductibles à volonté, elles ne sont pas limitées par des supports matériels consommables comme c'est le cas pour les os secs par exemple.
- La simulation possible de cas rares ou difficiles : la simulation n'a pas de limite et on peut s'exercer sur des procédures compliquées de saignement, ou de mauvaise vision par exemple comme c'est le cas avec l'arthroS (Virtamed). Tous les cas imaginables de pathologies rares peuvent être simulés.
- Sans aucun problème éthique, contrairement à d'autres simulations qui malgré un apport pédagogique indéniable posent des problèmes éthiques importants : la pratique sur les animaux vivants ou morts ou encore sur les cadavres.

- Dans un environnement contrôlé, et sans aucun risque notamment infectieux contrairement aux entraînements sur les animaux ou les cadavres avec parfois des équipements de protection minimum : gants de mauvaise qualité, absence de protection oculaire...

- Avec un retour sur les performances, communément nommé « feedback ». A la fin de chaque procédure, un bilan final objectif est donné avec un score précis, le temps de réalisation, la précision avec le nombre de gestes ou la longueur d'arthroscope ou d'instrument « rentrée » dans l'articulation, et le nombre de collisions parfois traduit en pourcentage de « scratching » cartilagineux qui donne des informations sur le caractère invasif de la procédure, en d'autres termes la sécurité. Ces données sont enregistrées sur le profil de l'étudiant et permettent un suivi dans le temps. Ceci est un avantage essentiel car il permet un retour objectif, permet de mesurer la progression, de se comparer aux autres et c'est une source de motivation dans la course à la performance.

- L'autoformation en autonomie plus ou moins complète. En effet après une séance d'initiation, l'étudiant peut progresser de manière autonome la plupart du temps. La présence d'un manipulateur (ex : pour sortir les cadavres, anesthésier les animaux...) ou d'un aide opératoire n'est pas requise. La présence permanente d'un senior ou d'un formateur n'est pas non plus obligatoire, même si cela est à modérer comme nous le reverrons plus tard. Ceci permet une grande accessibilité à la formation et une grande liberté sans logistique lourde qui limiterait le nombre de sessions possibles.

Des défauts sont tout de même à noter :

- Le coût. Véritables objets high-tech, ils sont le fruit d'un développement considérable impliquant ingénieurs, informaticiens, chirurgiens, spécialistes de l'éducation, donc très onéreux. Les simulateurs nécessitent des ordinateurs puissants qui eux aussi sont chers. Les instruments (caméra, crochet, pince, shaver, pédales) sont spécifiques au simulateur, ils sont bardés de capteurs, d'accéléromètres et donc développés puis produits en petite série ce qui entraîne des dépenses considérables. Ainsi le prix d'un tel simulateur avoisine les 100 000 euros.

- La fragilité. Les accéléromètres et différents capteurs sont extrêmement précis et donc très fragiles, imposant des précautions d'utilisation. Il y a donc des avaries de matériel, qui nécessitent un renvoi au fabricant pour des réparations qui peuvent prendre plusieurs semaines et rendre le simulateur inutilisable.
- Le caractère très récent de ce type de simulation entraîne forcément un manque de preuves de son efficacité et notamment sa validité de transfert. De plus il faut se familiariser avec ce matériel et réfléchir aux meilleures manières de l'intégrer dans un cursus de formation.

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - accessibilité - feedback performances et autonomie - rentabilité temps / pratique - réutilisable indéfiniment - nombreuses pathologies - cas rares 	<ul style="list-style-type: none"> - coût d'achat - fragilité du matériel et entretien - réalisme graphique

Tableau 4 - Avantages et inconvénients des simulateurs haute fidélité.

Les simulateurs par réalité virtuelle évoluent vite et s'imposent peu à peu comme le moyen le plus efficace et le plus rentable de s'entraîner à l'arthroscopie. Comme le résume très bien Gallagher dans son article « les simulateurs réalité virtuelle haute fidélité confèreront le plus grand transfert de compétences à la chirurgie in vivo, mais les autres simulateurs moins coûteux conduiront également à une généralisation de compétences considérablement améliorées » (45).

LE PROGRAMME

Le simulateur n'est qu'un outil. Les preuves des bénéfices pour la formation sont récentes, donc pas tout à fait ancrées dans les mœurs des écoles de chirurgie françaises et encore sous estimées. La mise en place d'un programme au sens large

est indispensable afin de familiariser les nouvelles générations aux technologies d'apprentissage modernes mais aussi d'exploiter au maximum les potentiels du simulateur et des internes dans le but d'atteindre de meilleurs niveaux en arthroscopie. Comme le décrit très bien Mabrey en 2010 (46), l'orthopédie est en retard dans le monde de la simulation : **les simulateurs de réalité virtuelle sont disponibles mais sous utilisés à cause du manque de programme.** Pour développer notre propre programme, la lecture de revues de la littérature rédigées par des formateurs d'expérience a permis d'y intégrer les notions essentielles.

Ainsi en orthopédie en 2005 Issenberg réalise une revue de la littérature sur 34 ans et 109 études afin de répondre à la question « quelles sont les caractéristiques et les utilisations des simulateurs haute-fidélité qui conduisent à l'apprentissage le plus efficace ? »(47). Les dix caractéristiques principales retenues sont résumées dans le tableau 5.

Ces critères sont repris et cités dans le rapport de l'HAS sur la simulation en santé (21) pour intégrer la simulation avec succès et avec les meilleurs résultats possibles.

Tableau 5 - Les caractéristiques principales pour intégrer la simulation aux cursus.

CARACTÉRISTIQUES	NOMBRE D'ÉTUDES APPUYANT CES CARACTÉRISTIQUES (EN %)
1- Offrir un débriefing (feedback)	47 %
2- Pratique répétée	39 %
3- Intégration dans le curriculum	25 %
4- Niveaux variables de difficultés	14 %
5- Diversifier les sources d'apprentissage	10 %
6- Proposition de nombreux cas	10 %
7- Environnement contrôlé	9 %
8- Apprentissage individuel participatif	9 %
9- Remplir des objectifs précis et mesurables	6 %
10- Simulateur validé	3 %

D'ailleurs Gallagher consacre entièrement une revue de la littérature dans « le but d'informer les chirurgiens et formateurs sur les différentes pratiques pour une intégration réussie de la simulation dans un programme de formation de chirurgie » (45). Il en ressort que :

- La réalité virtuelle doit être systématiquement intégrée dans un programme d'éducation et de formation globale, adapté aux internes qui évalue objectivement les compétences techniques.
- L'évaluation des performances doit se faire sur des paramètres métriques validés pertinents pour la tâche chirurgicale développée.
- Un objectif de niveau minimum de compétence à atteindre, doit être déterminé objectivement.
- Le résultat est meilleur si la formation est planifiée sur une base d'intervalles plutôt que sur une session intensive unique.
- L'utilisation de simulateurs haute fidélité est probablement la plus efficace.

Ceci résume exactement les caractéristiques du programme idéal : un programme est indispensable, il doit être obligatoire, adapté au niveau des internes, intégré dans un curriculum de formation, avec un apprentissage individuel participatif, par sessions répétées, dans un milieu contrôlé par un formateur, sur un simulateur validé offrant un débriefing sur chaque procédure afin de remplir lors d'une évaluation des objectifs précis et mesurables. En diversifiant les sources, il offre un très bon complément d'apprentissage au mode d'apprentissage traditionnel auprès d'un senior ou de séances de science et de bibliographie.

Avoir un programme standardisé structuré offre de nombreux avantages. Il crée un climat de confiance : un programme spécialement conçu pour les internes et adapté à leur niveau, présente un bénéfice supposé sur leurs performances. Il offre un gain de temps : les internes suivent directement leur programme, avec pour motivation de le finir et avec un esprit d'émulation car tous ont les mêmes exercices. La littérature a prouvé la supériorité d'un programme structuré notamment dans cet essai randomisé contrôlé de Pearson qui, sur un simulateur de chirurgie viscérale a testé quatre groupes différents : trois structurés et un non structuré. Le temps moyen pour réaliser la tâche

a été significativement diminué dans les 3 groupes structurés (48).

Le caractère obligatoire est un point important. Malgré un bénéfice prouvé et reconnu par les internes, l'utilisation du simulateur doit être motivée sous peine de sous-utilisation. Ceci a été retrouvé dans notre expérience avant cette enquête avec une fréquentation faible, mais aussi dans la littérature avec notamment cette étude de Chang (49). Réalisée aux Etats Unis en 2007 sur des résidents qui, après un cours d'introduction à un simulateur de chirurgie générale, étaient encouragés à aller développer leurs compétences chirurgicales sur la base du volontariat. Après trois mois seuls 31 % sont allés au moins une fois au simulateur alors qu'une grande majorité des résidents pensent le simulateur utile à la formation. La fréquentation se faisait principalement pendant les heures de travail (70 % contre 30 % sur les repos ou les journées off). Les raisons principalement invoquées étaient une distance hôpital simulateur importante et le manque de temps disponible. L'étude conclut donc que, sur la base du volontariat, la participation est minimale, elle doit donc être obligatoire pour être intégrée dans un programme de formation. Les sessions devraient être réalisées sur des plages horaires aménagées durant les heures de travail et sur un simulateur à proximité du lieu d'exercice comme c'est le cas dans notre centre. Une autre enquête de AAOS de Karam révèle que 80 % des directeurs de programme de formation et 86 % des internes sont d'accord pour dire que la simulation devrait être obligatoire dans un programme standardisé (50).

La pratique répétée paraît un moyen simple d'améliorer les performances. En effet de nombreuses sessions plus courtes sont préférables à peu ou une unique session très intense. Le fait de fractionner offre de nombreux avantages ; il diminue la fatigue et la lassitude à se servir du simulateur, pour préserver un certain usage récréatif dans le bon sens du terme « une pause à l'hôpital ». Cela permet également d'étaler les sessions dans le temps et de renforcer l'apprentissage. Cette régularité est également la base de la formation continue. Le programme bordelais consiste à réaliser un nombre d'exercices (ou procédures) défini, il est divisible en autant de sessions que voulues.

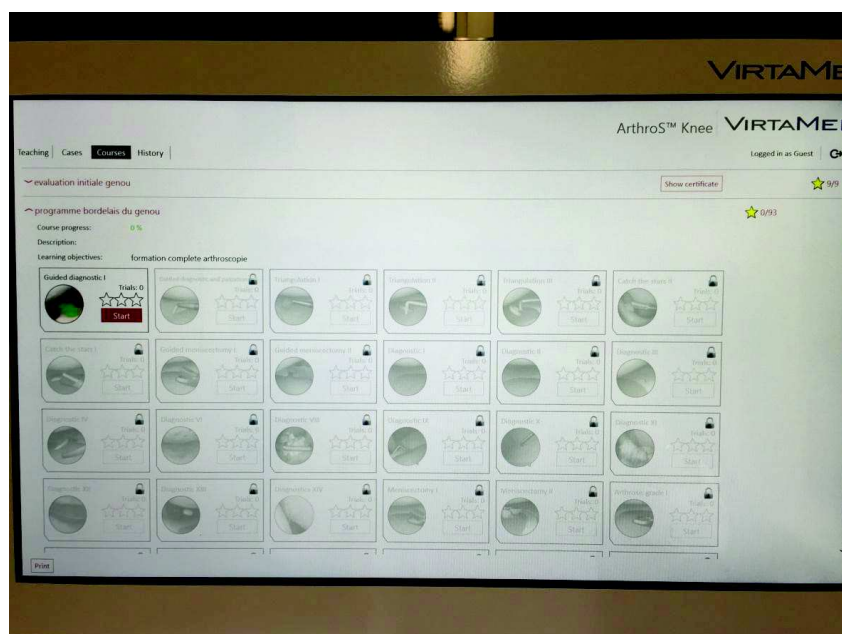
L'essai randomisé de Moulton en 2006 sur l'apprentissage d'une tâche chirurgicale (anastomose vasculaire) a prouvé la supériorité d'un schéma d'apprentissage de plusieurs cours répartis sur une semaine, par rapport à un unique cours intensif pour un même temps de pratique initial. Cette étude prouve qu'il est préférable d'avoir une formation composée de plusieurs sessions réparties. Un autre travail d'Howell, sur un simulateur d'épaule, montre une perte significative des acquis à 6 mois et appuie également le fractionnement même si on peut noter, dans cette étude, que le nombre initial de procédures (n=6) paraît faible pour acquérir une compétence chirurgicale (51). Jackson, dans le JBJS en 2012, publie une autre étude randomisée contrôlée, où 19 résidents ayant une expérience d'arthroscopie mais pas de réparation méniscale bénéficient d'une formation initiale sur simulateur de 12 procédures sur trois semaines. Puis les étudiants sont randomisés en trois groupes A B et C : A pratique une réparation par mois, B pratique une réparation tous les trois mois, et C pas de pratique.

L'évaluation à six mois ne montrait pas de perte de compétences pour le groupe C malgré l'absence de pratique. Ce qui laisse penser que la répartition sur au moins trois semaines est suffisante avec un minimum de procédures pour acquérir la compétence chirurgicale (courbe d'apprentissage) (15).

La notion d'un examen final est importante, il signe le caractère obligatoire de la formation et oblige à un certain niveau de résultats avec un contrôle. Il permet d'objectiver l'amélioration des compétences, ce qui est une source de motivation et de satisfaction supplémentaire. Il augmente considérablement la motivation et l'apprentissage, comme le montre des études de simulation médicale. Par exemple en réanimation dans un essai sur 140 étudiants randomisés en deux groupes : groupe 1 : 3,5 h de cours et entraînement avec un test de 30 minutes et groupe 2 : 4h de cours et entraînement. Une évaluation réalisée deux semaines après montrait un meilleur apprentissage dans le groupe 1 (52). Dans notre programme, un examen initial et un final ont donc été mis en place sur les trois mêmes exercices pour objectiver l'amélioration des performances. D'autres vont plus loin avec des examens éliminatoires comme Jacobsen sur simulateur (53) ou encore Koehler sur cadavres (54).

Il est également nécessaire d'obtenir une évaluation sur des paramètres objectifs impartiaux. Ceci n'est pas une donnée forcément évidente en arthroscopie où beaucoup de scores en tout genre ont été développés pour tenter d'objectiver des niveaux d'arthroscopie, comme les scores ASSET (55) BAKSSS ou IGARS (56) ... qui n'ont pas montré de supériorité des uns par rapport aux autres selon Middleton (57). Le simulateur a l'énorme avantage de fournir des données purement objectives grâce aux nombreux capteurs de la machine : chronomètre, accéléromètre, détection des chocs et frottements, souvent résumées en un seul score composite. Dans la revue de la littérature sur 83 études de Modi à propos de la simulation en arthroscopie, les mesures de résultats qui semblent pouvoir discriminer le niveau de compétence et l'expérience sont le temps de réalisation de la procédure (exprimé en secondes), la distance et le trajet parcourus par la caméra et/ou les instruments (en cm), et le nombre de collisions avec les structures anatomiques. Ceci est basé sur de nombreux travaux sur les simulateurs d'arthroscopie d'épaule et de genou, revues de la littérature (58), études diverses (59) ou encore études de validité de construction de très nombreux simulateurs (60)(61)(62)(63). Cependant les données purement métriques ne sauraient juger seules, la pratique de notre art. C'est pourquoi l'évaluation couplée avec un score validé (type ASSET (55)) paraît un bon compromis car il oblige la présence d'évaluateurs et l'observation des compétences acquises par les étudiants.

Figure 10 - Le programme Bordelais du genou vu sur le simulateur.



Un simulateur haute-fidélité validé permet aussi un apprentissage individuel participatif dans un environnement contrôlé avec des mesures objectives, des paramètres métriques précis, dans des procédures de difficulté croissante avec un niveau minimum à atteindre. Celui-ci est déterminé par le formateur pour boucler un programme.

« Chaque société savante doit identifier des programmes de formation par la simulation adaptés aux priorités de leur discipline. » - HAS.

La création d'un programme spécifique et structuré est tellement cruciale pour l'intégration de la simulation que les grandes instances de santé s'y impliquent directement. Ainsi en chirurgie viscérale, discipline pionnière dans la simulation, on peut lire, dans une revue de la littérature de Bashankaev (64), la création du programme Fundamental Laparoscopique Surgery (FLS) par l'American Gastro Intestinal Endoscopic Surgeons (SAGES) appuyé par l'American College of Surgeon (ACS). Il est clairement décrit dès 2007 dans un article entièrement dédié (65). Ce programme très complet basé sur des QCM, des scénarii cliniques puis des tests de compétences manuelles sur simulateurs est une condition pré requise à la certification par l'American Board of Surgery et l'American Board of Colon and Rectal surgery. Il offre trois phases soigneusement conçues et structurées par des experts pour améliorer la formation des résidents grâce à des simulations reproductibles avec vérification de compétences avant une application opératoire. La première phase « Basic skills and Task » pour des compétences basiques simples (utilisation de la caméra, coordination main-yeux, faire un nœud) se déroule sur simulateur et box trainer. La deuxième « advanced procedures » s'appuie sur les simulateurs, les animaux et les cadavres pour former les résidents sur toutes les étapes d'une procédure dans un environnement simulé. Puis la troisième « Team Based Skills » permet de développer la prise de décision, la communication interdisciplinaire entre professionnels et le professionnalisme ; en utilisant une approche basée sur le briefing et débriefing. C'est un modèle de ce genre, extrêmement abouti qui devrait en inspirer beaucoup d'autres.

En France l'HAS (21) se prononce sur la simulation en général et on peut lire la proposition 6 : « **Chaque société savante doit identifier des programmes de formation par la simulation adaptés aux priorités de leur discipline.** ».

En orthopédie, l'American Academy Orthopedic Surgery (AAOS) (31) a directement réuni une équipe de chirurgiens en association avec des ingénieurs pour créer un programme nommé KAST (soit Knee Arthroscopy Surgical Trainer). Supporté par de nombreuses associations the Arthroscopy Association of North America (AANA), et the American Board of Orthopaedic Surgery (ABOS), ce programme a pour ambition une réelle intégration de la simulation aux cursus pour diminuer les erreurs, gagner du temps de bloc opératoire, en augmentant l'expérience globale des résidents. Il est décrit au travers de article de Mabrey en 2010 (46) en se basant sur une revue de la littérature mais il ne paraît pas aussi abouti que le FLS.

En France il ne semble pas exister de tels programmes nationaux de validation. Néanmoins en Août 2017, un « Guide de simulation chirurgicale à l'usage des coordonnateurs du DES d'orthopédie et traumatologie » a été transmis par le Collège Français de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique. Il témoigne de la volonté de combler le retard français dans le domaine de la simulation. On y retrouve des propositions pour l'intégration de la simulation pour la nouvelle « phase socle » de la réforme des études de chirurgie. Ces propositions « ne présentent pas de caractère obligatoire ». Il y est recensé cinq domaines d'acquisition de base : dans le domaine trois, intitulé « Maîtriser la triangulation arthroscopique », les compétences suivantes sont à acquérir :

- Diriger une optique fore oblique 30° dans l'espace
 - Toucher, saisir et déplacer des objets sous contrôle de cette optique
 - Manipuler les instruments d'exploration à visée diagnostique.
- De plus, la validation se ferait sur le même simulateur « Virtamed » que celui de l'université de Bordeaux, ce qui ferait de notre faculté un centre de référence et d'examen en simulation. Ce programme national, très récent, ne se destine pour l'instant qu'aux internes les plus jeunes.

LE FORMATEUR

Bien que les simulateurs récents permettent de réaliser un programme en quasi autonomie. La présence d'un formateur

paraît indispensable. Comme un entraîneur dans une équipe sportive, il permet de suggérer, de stimuler la réalisation de sessions, et il offre une source de motivation complémentaire.

Le formateur ou l'instructeur doit être un praticien directement impliqué dans la formation : professeur universitaire, maître de conférences, praticien hospitalier ou chef de clinique. Il peut également être un interne assez avancé mais l'avantage de sa proximité avec les autres internes ne permet pas de compenser son manque d'expérience clinique, arthroscopique et de l'enseignement. Le profil idéal est donc un praticien volontaire expérimenté à l'arthroscopie. De nombreuses formations en simulation se développent en France, et comme le souligne l'HAS dans le rapport au travers de la proposition 5 « Les formateurs en matière de simulation doivent bénéficier d'une compétence réelle, validée par l'obtention de diplômes universitaires spécifiques ». Un article intéressant de Balfagon dans une revue dédiée aux internes fait le point « Devenir formateur en simulation : ça ne s'invente pas » (66). On y trouve répertoriés onze diplômes universitaires ou interuniversitaires à travers la France, comportant en général trois semaines de cours avec une partie pratique soit une centaine d'heures de formation. L'enseignement par la simulation est en plein essor en France car les onze diplômes ont vu le jour en seulement huit ans ! D'autres alternatives y sont proposées comme des formations courtes allant d'un à cinq jours, peut être pour faire naître des vocations et sensibiliser ce mode d'enseignement. Le coût moyen de ces formations varie de 500 à 2800 euros. En février 2014 la Société Francophone de Simulation en Santé (SoFraSimS) a même été créée « pour promouvoir l'enseignement par la simulation en formation initiale et continue dans tous les domaines de la santé » (site www.sofrasim.fr).

Le formateur endosse de multiples rôles très importants. Tout d'abord d'accueil, car il est essentiel qu'une personne présente la machine et son fonctionnement pour démystifier le simulateur et montrer la grande facilité d'utilisation aux internes. Cette phase de familiarisation est primordiale et permet de franchir le cap de l'appréhension. Il doit également veiller à l'avancement dans le programme de chaque interne. C'est aussi une source de motivation suggérant ou organisant des sessions de simulation individuelles ou collectives aux internes. Il permet

également l'apport de précieux conseils techniques pour l'arthroscopie réelle et ses difficultés supplémentaires par rapport à la simulation tels que le placement du corps, le positionnement des mains sur les instruments, l'utilisation de tels ou tels instruments (angulation des pinces à ménisque, shaver ou pinces...), l'exposition en ouvrant les divers compartiments ; il apporte des informations sur les différents portails et leurs indications. Ces conseils individuels et personnalisés sont capitaux : ils permettent de souligner les points forts et les défauts de chacun et d'orienter le travail des internes. Car comme le montre la littérature tous les internes ne sont pas égaux, il y a des différences notables expliquées par des compétences innées (17). Ces informations ne sont jamais dispensées par la machine, qui offre froidement des performances métriques pures, les internes offrent certainement plus de crédibilité au formateur. Ceci permet également de renforcer l'immersion car cette expérience replace l'interne dans un contexte de formation comparable au bloc opératoire où il s'entraîne sous l'œil attentif de son responsable. Il s'éloigne du jeu vidéo pour se rapprocher de la réalité.

La présence du formateur est une réflexion importante. Le mode semi autonome de la formation sur simulateur est un avantage non négligeable, il permet une grande liberté et doit être conservé. Il responsabilise l'interne sur sa formation et ne limite pas les heures et l'accès à la machine. La présence de l'entraîneur peut être occasionnelle pour orienter les internes par compagnonnage, par exemple au travers de plages horaires aménagées comme une permanence, ce qui permet un entraînement un peu spécial, et peut renforcer les liens interne enseignant dans un environnement contrôlé moins stressant.

Les bénéfices de la présence d'un formateur sont clairement retrouvés au travers de la littérature. Encore une fois la chirurgie viscérale fait figure d'avant-gardiste avec une étude randomisée sur l'entraînement sur simulateur virtuel de laparoscopie sur 99 étudiants en médecine et seniors sans expérience de laparoscopie (67). Deux groupes randomisés : un groupe contrôle uniquement guidé par le simulateur et son feedback et un groupe interventionnel avec instructeur au moins trois fois durant l'entraînement, le but étant d'acquérir les compétences pour une tâche complexe. Dans le groupe avec instructeur les temps d'intervention et les répétitions ont été divisés par deux

avec des résultats plus homogènes. Les performances ont été significativement augmentées et les résultats plus homogènes sont probablement dus à des conseils avisés et adaptés à chaque sujet pour corriger ses propres défauts. La conclusion de l'étude est que la présence d'un instructeur augmente l'efficacité de l'entraînement sur simulateur à une tâche complexe. Une autre étude randomisée contrôlée sur l'apprentissage des sutures et nœuds sur ordinateur conclut que seuls les groupes avec la présence d'un expert ont une consolidation après un mois (68). Les questionnaires d'auto satisfaction soulignent également que la présence d'un feedback par un expert (instructeur) est important (41).

Dans notre étude « le formateur » était un interne en fin de cursus présent systématiquement à l'initiation et lors de l'évaluation finale. Dans les remarques libres du questionnaire final de satisfaction, 6 participants sur 17 (35 %) ont spontanément souligné que la présence d'un instructeur serait une bonne chose au cours du programme. Les deux observateurs ont noté dans l'évaluation finale des remarques et améliorations techniques à apporter à chaque participant.

La présence d'un instructeur est fortement recommandée dans tous les résumés et études sur l'intégration de la simulation (21) (69) notamment en orthopédie (70) (31). Il est prouvé qu'elle permet d'augmenter l'efficacité du simulateur sur l'entraînement et d'homogénéiser les niveaux entre les étudiants en apportant des conseils personnalisés.

5 - LA SIMULATION A FAIT SES PREUVES DANS LA LITTÉRATURE

La simulation s'impose peu à peu comme un moyen efficace d'acquérir des compétences chirurgicales. Les preuves dans la littérature sont fortes.

On retrouve parfois un certain scepticisme face à la simulation, et contrairement aux croyances, ce ne sont pas forcément les plus anciens les plus réticents, comme le démontre une enquête néo zélandaise (71). Les arguments contre sont souvent faibles, le plus fréquemment c'est le parallélisme entre jeux vi-

déos et simulation qui est avancé. Mais nous sommes en droit de nous demander si la dextérité aux jeux vidéo n'aiderait pas à une certaine aisance en chirurgie et notamment celle avec un écran interposé ? A tel point que cette relation a été étudiée dans la littérature. En chirurgie viscérale, Rosser (72) montrait que les joueurs réguliers (>3h par semaine) étaient 27 % plus rapides et commettaient 37 % moins d'erreurs ! Ces données sont également retrouvées dans une revue de la littérature de Ou et al (73) qui confirment les capacités psychomotrices supérieures pour les joueurs réguliers en laparoscopie.

La simulation, c'est également un moyen différent d'apprendre ou approfondir l'anatomie chirurgicale en diversifiant les sources, en offrant une expérience visuelle de navigation qui favorise la mémoire à long terme (Figure 11). Des essais randomisés, notamment sur l'épaule, montre que le simulateur est au moins aussi efficace qu'un livre pour cet apprentissage (74) et très apprécié par les étudiants (75). Ceci est retrouvé dans notre enquête où 6 des 6 externes (étudiants en 2e cycle) ont spontanément cité leur progrès en anatomie dans les avantages de la simulation.

Figure 11 - Apprentissage de l'anatomie du genou sur le simulateur par un médecin généraliste.



Pour la validation de la simulation comme entraînement validé c'est encore une fois en chirurgie viscérale que la recherche est la plus avancée ; à tel point que le bénéfice de la simulation pour l'apprentissage de la coelioscopie ne souffre plus d'aucune contestation. Dans une revue de la littérature de 2013, Nagendran (76) répertorie 8 essais randomisés contrôlés évaluant l'entraînement virtuel contre une autre forme d'entraînement sur les internes peu expérimentés par des évaluations finales uniquement sur de vraies coelioscopies, avec une vraie validité de transfert. Les résultats concluent à une diminution des temps opératoires et une augmentation des performances chirurgicales que ce soit comparé à un entraînement standard ou sur des « boîtes d'entraînement ». De très nombreux articles et revues de la littérature confirment ces résultats (32)(77)(78)(79). On peut donc dire que, pour les chirurgies vidéo assistées, un entraînement par simulateur bien structuré a un bénéfice incontestable sur les capacités chirurgicales.

La validation de l'entraînement sur simulateur en orthopédie est bien résumée dans les revues de littérature récentes, comme celle de Slade en 2014 (80) portant sur 413 études, 13 sont sélectionnées 6 sur l'épaule et 7 sur le genou.

La validité de construction permet de savoir si le simulateur est capable de différencier les novices et les experts. La plupart sont réalisées pour valider un simulateur et sont donc largement retrouvées dans la littérature (62) (61) (81) (82) (83) (53) (63) pour le genou. Le simulateur arthroS utilisé dans notre étude a fait l'objet de validations de construction récentes (84) et se montre très performant dans des études comparatives (85) . La validation de construction représente en quelque sorte le premier niveau de preuve, il permet de confirmer que l'ensemble des évaluations développées pour mesurer le niveau de performance en arthroscopie sont valides et permettent bien de différencier les niveaux en arthroscopie.

Un essai randomisé contrôlé de 2015 a comparé deux groupes de juniors : un groupe « simulation » et un groupe « apprentissage didactique » au cours d'une arthroscopie diagnostique. Une évaluation a été réalisée sur cadavre utilisant les critères de temps et les dégâts (par une échelle subjective de 1 à 10). Le

groupe simulation était supérieur avec -35 % de temps (86). Cette étude est une volonté de prouver la supériorité de la simulation à un apprentissage didactique pur en mesurant les résultats sur cadavre.

La **validité de transfert**, elle, permet de vérifier si les acquisitions faites sur simulateur se transfèrent bien à l'arthroscopie réelle. C'est une relation directe qui élimine un maximum de biais de confusion. Cette validité de transfert est plus difficile à prouver car méthodologiquement plus lourde mais elle est la preuve irréfutable de l'amélioration des compétences par le simulateur. Elle est supportée par deux études majeures dont la plus ancienne est un essai randomisé contrôlé d'Howells, sur la formation à l'arthroscopie diagnostique du genou (87). Vingt internes juniors d'orthopédie y sont randomisés : un groupe formation standard au bloc et un groupe avec un protocole d'entraînement complémentaire sur simulateur. Le protocole comportait 18 sessions d'entraînement sur simulateur réparties sur une semaine avec la présence d'un instructeur. L'évaluation s'est faite au bloc opératoire sur un patient réel sous la direction d'un chirurgien senior « aveugle » vis à vis de la formation réalisée. Elle a été réalisée à l'aide d'un score validé type GRS (Global Rating scale) avec 12 items notés de 0 à 5 et une checklist (Orthopaedic Competence Assessment Project) afin de rendre l'évaluation la plus objective possible. Le groupe avec entraînement sur simulateur a considérablement surpassé le groupe non formé de manière significative.

Un deuxième essai contrôlé randomisé de Cannon dans le JBJS en 2014 confirme ces résultats (88) sur 48 internes de troisième année randomisés en deux groupes (un contrôle et un entraîné sur simulateur) pour apprendre une arthroscopie diagnostique de genou. Sur le simulateur de réalité virtuelle un programme progressif de difficulté croissante a été validé par les internes réalisant l'ensemble en environ 11 heures de pratique. Ce programme très intéressant mérite d'être détaillé car il a été basé sur la performance de 5 chirurgiens seniors expérimentés dans l'arthroscopie (50 à 125 procédures par an) sur le simulateur. Il se compose de 4 tours de procédures : le premier se déroule avec une aide montrant la position correcte de l'arthroscope sans limite de temps ; le deuxième sans aide sans limite de temps ; le troisième avec une limite de temps de 150 % du temps de

référence des seniors et le quatrième de 83 % du temps de référence. L'évaluation s'est faite au bloc opératoire sur un patient réel sous le contrôle d'un chirurgien. Elle a été mesurée à l'aide d'une checklist procédurale, d'un score global (Global Ratings of arthroscopy performance) et du nombre d'interventions nécessaires du chirurgien responsable par dix évaluateurs externes sur des enregistrements. Les résultats démontrent la validité de transfert de l'entraînement sur simulateur : les internes entraînés sur simulateur sont significativement meilleurs sur les performances globales (score de checklist procédurale) et les étapes de palpation. Il n'y avait pas de différence sur la visualisation ou le temps de réalisation.

Les revues de la littérature considèrent également la validité de transfert comme acquise (4) (80) (89) (31).

2/ MISE EN PLACE & ÉVALUATION PROSPECTIVE D'UN PROGRAMME DE FORMATION BORDELAIS À L'ARTHROSCOPIE DU GENOU SUR SIMULATEUR DE RÉALITÉ VIRTUELLE.

RÉSUMÉ

Introduction

L'intégration de la simulation arthroscopique de type réalité virtuelle (SRV : *Simulateur de type Réalité Virtuelle*) dans les cursus de chirurgie orthopédique est indispensable face à l'évolution vers l'hyperspécialisation et au contexte médico-légal actuel.

L'objectif de cette étude était de développer un programme de formation d'arthroscopie du genou sur un SRV et de l'évaluer afin de vérifier l'hypothèse qu'il augmentait significativement les performances des étudiants.

Matériel et méthodes

Une cohorte prospective a été mise en place au Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Bordeaux.

Elle comprenait 17 étudiants qui ont été évalués avant et après la réalisation d'un programme sur un SRV comportant 31 exercices.

Les performances objectives ont été mesurées : le temps (en

secondes), la longueur parcourue par l'arthroscope dans l'articulation (cm), les dégâts cartilagineux (en pourcentage des surfaces) sur trois procédures : exploration guidée, diagnostique libre, et thérapeutique. Un questionnaire final a été réalisé pour évaluer leur indice de satisfaction, leurs sensations de réalisme sur une échelle type Likert sur cinq, les avantages et inconvénients de la formation, ainsi que les améliorations à apporter.

Résultats

Les performances des sujets ont été améliorées statistiquement de manière significative :

- 60 % pour le temps, - 47 % de longueur parcourue, - 25 % de dégâts ($p < 0,05$). Les scores de satisfaction ont été de 4,6 sur 5 avec des remarques pour les évolutions à venir notamment concernant la présence d'un formateur et l'extension principalement à l'épaule.

Discussion

Le programme développé a amélioré significativement les performances des étudiants. Cependant des évolutions sont à apporter avec notamment la présence d'un instructeur dédié, une intégration dans le diplôme de chirurgie ainsi qu'une extension aux autres articulations : épaule, cheville, hanche.

Etude prospective Niveau III

Pas de conflit d'intérêt.

Mots clés : Simulateur de réalité virtuelle, arthroscopie du genou, programme de formation.

Keywords : Virtual reality simulator, knee arthroscopy, training residency program.

Lexique : SRV : Simulateur de type Réalité Virtuelle

INTRODUCTION

De nos jours, la formation des jeunes chirurgiens se confronte à la multiplication de nouvelles techniques notamment en arthroscopie (1). Cette discipline implique une courbe d'apprentissage importante (14) (15) accessible à la simulation de type réalité virtuelle.

De plus les lois sur la restriction des horaires de travail des internes, en Europe et en France, imposent une limite

d'heures par semaine ainsi que les repos de sécurité ; diminuant considérablement les opportunités d'apprentissage pour les internes en chirurgie orthopédique (18).

La sécurité des patients est un point fondamental, et la simulation a largement prouvé sa capacité à diminuer les erreurs chirurgicales sur les patients (23)(24)(25)(26)(27), d'où le dogme « **jamais la première fois sur le patient** » (21). Il est ainsi indispensable d'assurer un niveau de base à tous les opérateurs avant le bloc (4).

Enfin la pression financière pesant sur les structures de santé, impacte les modalités de formation par le compagnonnage. « Former prend du temps ». Selon Farnworth, une procédure de reconstruction de ligament croisé antérieur réalisée par un interne coûte 661 dollars de plus que si elle avait été réalisée par un sénior, auxquels il faut ajouter le prix des consommables supplémentaires éventuels (28). Dès 1993, Satava voyait, aussi, déjà en la simulation un moyen d'économie (29).

Comme le résume Atesok dans le JAAOS : Le challenge pour la formation des jeunes est désormais d'apprendre plus de procédures, de plus en plus complexes, avec une courbe d'apprentissage importante en moins de temps tout en optimisant la sécurité des patients; d'où la nécessité de développer des méthodes d'apprentissage alternatives hors bloc (31).

L'évolution dans un petit environnement 3D projeté sur un écran 2D, des instruments facilement imitables, une gestuelle fine avec une coordination œil main importante, des procédures autonomes (sans aide opératoire) font de l'arthroscopie un domaine propice à l'utilisation des simulateurs de type réalité virtuelle (SRV).

Pour une efficacité maximum, la simulation doit être intégrée dans un cadre bien défini (47) (21). Elle nécessite un simulateur, un formateur et un programme.

L'objectif principal de cette étude était de développer un programme de formation à l'arthroscopie du genou sur simulateur adapté au cursus bordelais puis de l'évaluer à la fois sur des performances objectives pour confirmer la progression technique ,et sur un auto-questionnaire pour proposer des évolutions.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sujets

Une étude de type cohorte prospective sur 18 étudiants a été menée : 12 internes et 6 externes du CHU de Bordeaux, sur une période allant de février à juillet 2017, Tous inclus sur la base du volontariat.

Simulateur

Le simulateur nommé arthroS de Virtamed a été utilisé. C'est un SRV haute fidélité d'arthroscopie du genou. Il se base sur un retour d'information haptique passif sur un genou factice côté droit (Figure 12).

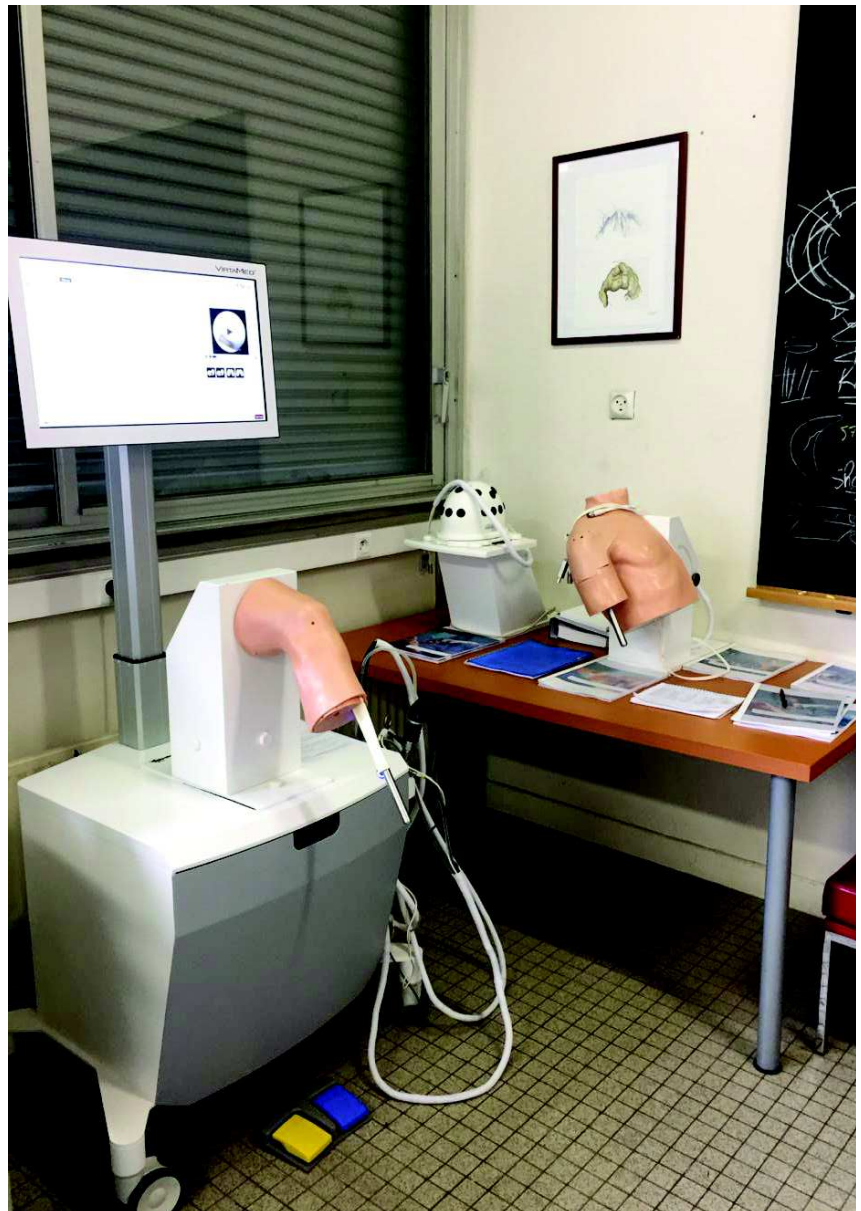


Figure 12 - Le simulateur Virtamed.

Programme

Le programme bordelais du genou, a été créé avec le logiciel du simulateur. Après un exposé du déroulement de l'étude et une session d'initiation au simulateur avec un responsable, les étudiants ont été inclus dans l'étude.

Le programme se présentait sur un mode progressif, où 31 exercices étaient débloqués au fur et à mesure, après avoir atteint un niveau minimum requis. Il fallait compléter l'ensemble des 31 exercices.

Il se composait de trois parties :

1. Une évaluation initiale avec un observateur, basée sur 3 exercices : « un tour » du genou sain guidé (figure 13), une arthroscopie diagnostique (figure 15), une ménisectomie médiale (figure 18).

2. L'entraînement :

a) Une séquence « basique » comprenant une démarche guidée de l'exploration d'un genou sain avec une visualisation des différentes structures et une utilisation simple des instruments en intra articulaire (*attraper des objets, placement du palpeur dans des cercles*) ;

b) Une séquence « diagnostique » pour dépister et repérer les différentes pathologies rencontrées ;

c) Une séquence « thérapeutique » comportant un tour diagnostique standardisé du genou par arthroscopie avec une procédure thérapeutique à réaliser (*ménisectomie, synovectomie, ablation de corps étrangers...*).

3. Une évaluation finale, après une période sans entraînement (période de « *wash-out* ») d'au moins 15 jours, portant sur les 3 mêmes exercices initiaux, une évaluation sur un score validé ASSET et un auto-questionnaire.

Les internes s'organisaient librement pour : le nombre, la fréquence et la durée des sessions. Le seul impératif était de terminer le programme avant l'évaluation finale.

Les internes ignoraient que l'évaluation finale portait sur les mêmes exercices que ceux de l'évaluation initiale, trois exercices non disponibles dans le programme d'entraînement.

Ce schéma a été validé par un organisme de méthodologie indépendant (département ISPED de l'université de Bordeaux).

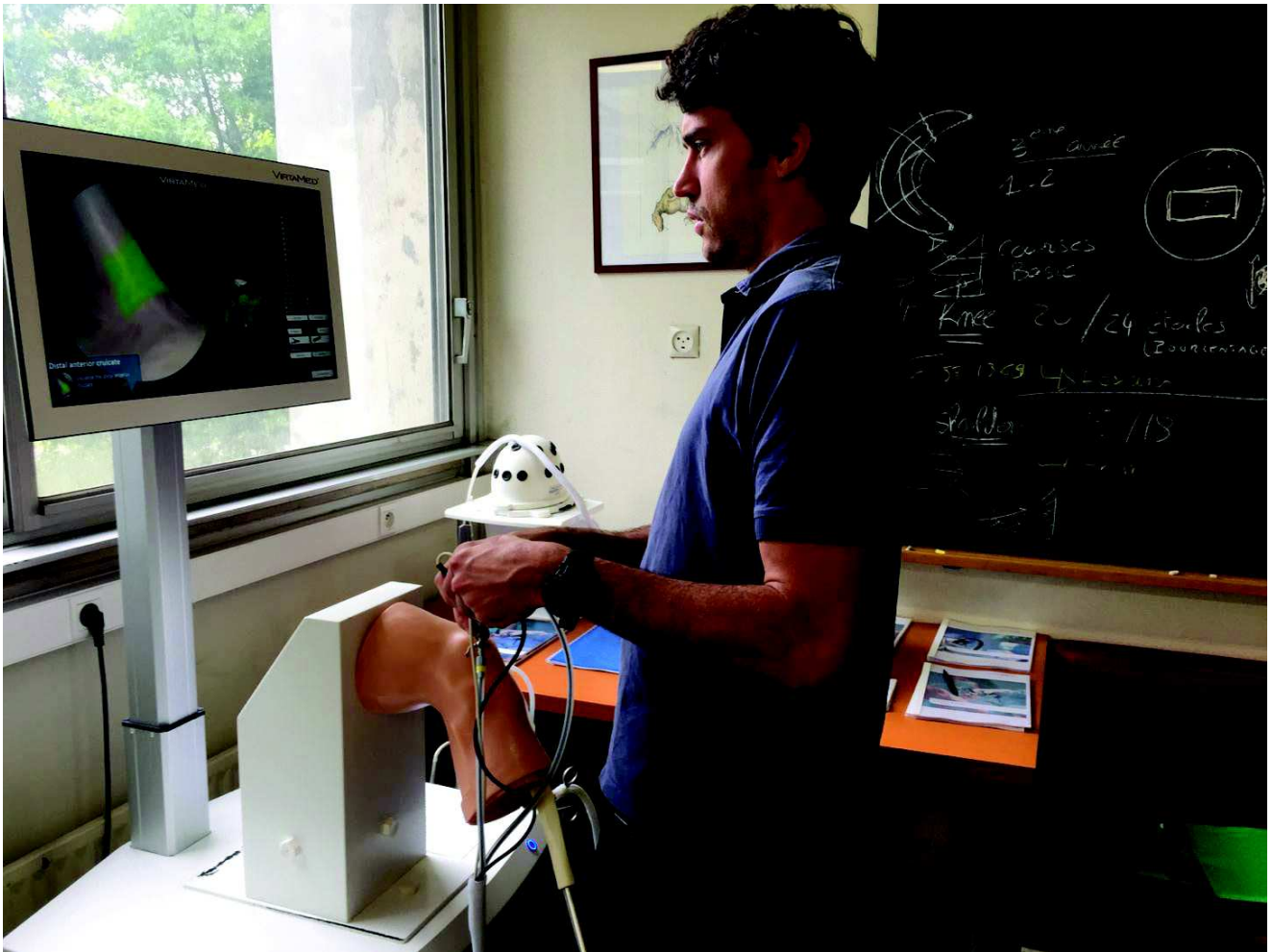


Figure 13 - Exercice de diagnostic guidé.

Evaluations

Elles ont été réalisées à l'aide des paramètres métriques de la machine pour une évaluation la plus objective possible des performances : le temps de procédure en secondes (**rapidité**), la longueur parcourue par l'arthroscope ou par un instrument dans l'articulation en centimètres (**précision**), et les dégâts cartilagineux exprimés en pourcentage de la surface abîmée sur le tibia et sur le fémur (**sécurité**).

Ces paramètres sont validées par une littérature abondante: par exemple la revue de la littérature de Modi (58), l'étude d'Howells (59), ou encore les validations de construction de nombreux simulateurs de réalité virtuelle (60) (61) (62) (11).

Un score ASSET a été utilisé pour compléter l'évaluation finale, établi par deux examinateurs après consensus, pour tenter d'objectiver la gestuelle et la technique (90).

Un auto-questionnaire de satisfaction avec une échelle de Likert sur 5, a été complété par chaque participant. Il comportait également une partie libre pour les avantages, les inconvénients et

les améliorations à apporter (Figure 14).

Le but était d'évaluer la progression des étudiants et leur satisfaction.

QUESTIONNAIRE FINAL

1. Données perso
 Nom :
 Prénom :
 Semestre :
 Nombre de semestre d'orthopédie :
 Orientation : rachis MS MI
 Main dominante : droitier Gaucher

2. Avant la formation sur le simulateur :

- Nombre d'arthroscopies réalisées diagnostiques (tour de l'articulation) :
- Nombre d'arthroscopies réalisées Thérapeutiques (Ménisectomie, suture, ablation de corps étrangers, Ligamento) :
- AutoEvaluation de votre niveau d'arthroscopie :
 Débutant Intermédiaire Bon Expert
- Jugez vous votre formation en arthroscopie suffisante ?

3. Satisfaction

	1	2	3	4	5
1) Êtes vous satisfait de cette formation ?					
2) Avez vous eu la sensation de progresser ?					
3) Selon vous est elle utile ?					
4) Recommandez vous la formation aux autres internes ?					

3) Sur le simulateur

1) Réalisme Global

	1	2	3	4	5
Réalisme des graphiques (software) :					
Réalisme du matériel (hardware) :					
Réalisme sonore :					
Immersion :					

2) Avantages

3) Défauts

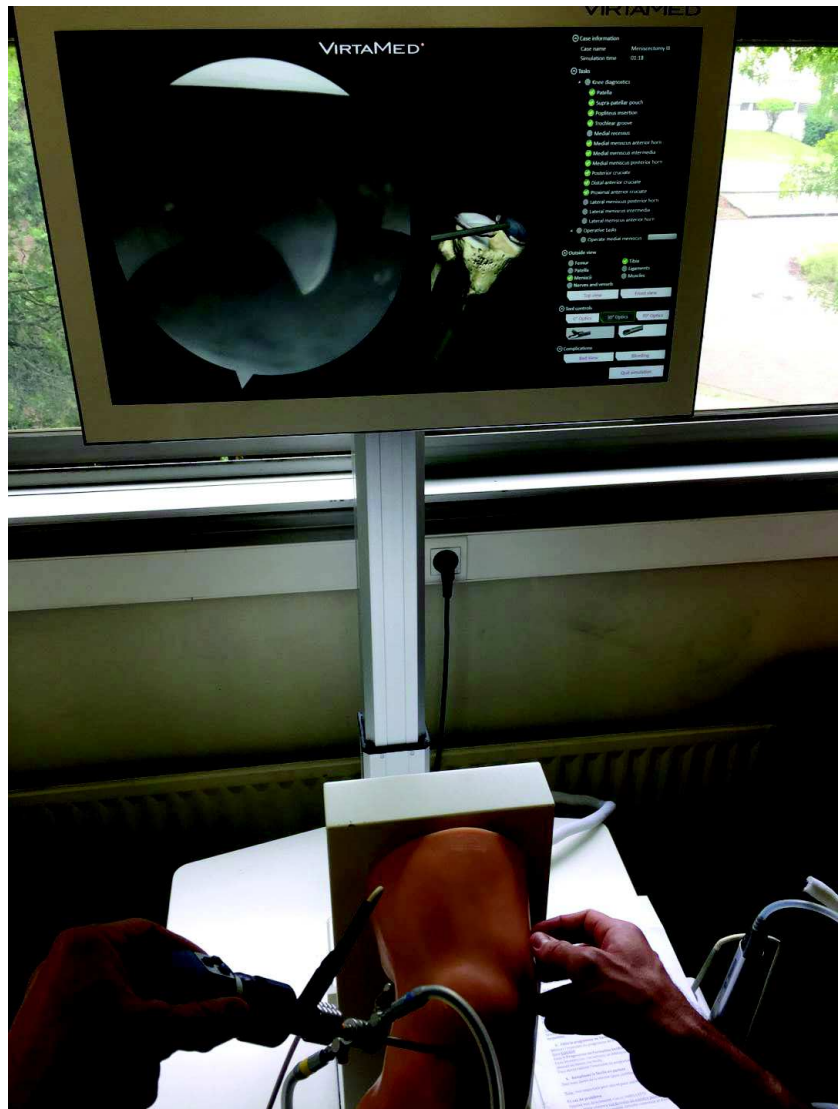
9) Améliorations à apporter à la formation

Figure 14 - Questionnaire de satisfaction

Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel R. Les variables quantitatives ont été comparées à l'aide du test de Wilcoxon.

Figure 15 - Exercice diagnostique : fissure radiaire du ménisque médial.



RÉSULTATS

Population

Il y avait 12 internes et 6 externes. Dans les 18 inclus, 17 ont terminé l'ensemble du programme.

Les internes étaient en moyenne en 5e semestre de l'internat, il y avait 15 droitiers et 2 gauchers. A ce stade de la formation les internes avaient réalisé en moyenne 4,8 temps arthroscopiques diagnostiques et 1,6 arthroscopies thérapeutiques durant leur cursus. Au départ, aucun (0 sur 11) ne jugeait sa formation en arthroscopie suffisante et la moyenne des auto-évaluations de leur niveau de 0 à 3 (0 = débutant ; 1 = intermédiaire ; 2 = bon ; 3 = expert) était de 0,2.

Résultats

Le temps moyen (*rapidité*) pour réaliser l'ensemble des exercices est passé de 453 secondes à 181 secondes soit une progression de 60 %. La longueur parcourue par les instruments (*précision*) est passée de 333 cm à 175 cm soit une économie de 47 %. Le pourcentage de surface cartilagineuse abîmée (*sécurité*) est passé de 11,9 % à 8,9 %, soit une diminution de 25 %. Tous les résultats étaient statistiquement significatifs ($p < 0,01$) excepté pour la sécurité des deux premiers exercices ; ils sont résumés par le tableau n°1.

Exercice 1			
	Moyenne initiale	Moyenne finale	p
Score total	36,41176	48	$p < 0,001$
Temps d'opération (s)	425,7886	189,4176	$p < 0,001$
Précision(cm)	167,1204	87,66615	$p < 0,001$
Sécurité (%)	0,08697723	0,08416904	$p = 0,747$

Exercice 2			
	Moyenne initiale	Moyenne finale	p
Score total	102	191,8235	$p < 0,001$
Temps d'opération (s)	379,9993	125,9224	$p < 0,001$
Précision (cm)	165,5563	78,91705	$p < 0,001$
Sécurité (%)	0,109824	0,08811476	$p = 0,109$

Exercice 3			
	Moyenne initiale	Moyenne finale	p
Score total	113,5882	132,1176	$p < 0,001$
Temps d'opération (s)	552,9768	226,9408	$p < 0,001$
Précision (cm)	666,565	359,0584	$p < 0,001$
Sécurité (%)	0,1623086	0,09437904	$p < 0,001$

Tableau 1 - Résultats principaux.

Pour les scores de satisfaction globale : les étudiants étaient satisfaits de cette formation à 4,6 sur 5 ; avec une impression subjective de progresser cotée à 4,7 / 5 ; avec une évaluation de l'utilité à 4,6 / 5 pour leur formation ; et une recommandation aux autres internes de 4,9 / 5 (Tableau n°2).

Tableau 2 - Résultats du questionnaire d'évaluation de la formation

QUESTIONNAIRE	SCORE MOYEN SUR UNE ÉCHELLE /5
- Êtes-vous satisfait de cette formation ?	4,6
- Avez-vous eu l'impression de progresser ?	4,7
- Utilité pour la formation	4,6
- Recommandation aux autres internes	4,9

Les scores de réalisme du simulateur ont été notés à 4 / 5 pour le graphisme, à 4,5 / 5 pour l'instrumentation, à 3,8 / 5 pour l'ambiance sonore, et à 3,9 / 5 pour l'immersion globale (Tableau n°3).

Tableau 3 - Résultats du questionnaire d'évaluation sur le réalisme

QUESTIONNAIRE	SCORE MOYEN /5
1. Réalité virtuelle	4
2. Réalisme du matériel	4,5
3. Réalisme sonore	3,8
4. Immersion	3,9

Les scores ASSET était de 27,5 pour le total, 29,6 pour les internes, et 23,7 pour externes.

Les avantages spontanément cités dans les commentaires libres ont été :

- Les progrès en anatomie que permet le simulateur (41 %, n=7 : et 100% des externes)
- L'accessibilité du simulateur (29%, n=5)

- La possibilité de répétition des procédures (n=3)
- La sensation de feedback (n=2)
- L'évaluation objective (n=2).

Les inconvénients consignés dans les commentaires libres ont été :

- Le manque de sensibilisation aux dégâts cartilagineux dans l'apprentissage du tour diagnostique standard (n=2) (Figure 16)
- La fragilité du simulateur (n=2)
- L'absence d'un formateur expérimenté (n=2)
- L'absence de genou gauche (n=1).

Les améliorations proposées ont été : la présence renforcée d'un formateur (n=6), l'intégration de cette formation arthroscopique au Diplôme d'Etude Spécialisée de chirurgie (DESC) (n=3), l'augmentation du nombre d'exercices (n=2), la création d'un programme similaire pour l'épaule (n=2), l'ajout d'une session sur cadavre (n=2).

Une étude de sous groupe n'a pas mis en évidence de différence significative entre les internes et les externes sur les performances initiales, leur progression (ou delta des moyennes), les performances finales (Tableau n°4).

		Temps (s)	Précision (cm)	Sécurité (%)
Initial	Interne	1299,5	700,1	0,132
	externe	1467,4	687	0,096
	p	0,3011	0,5249	0,0202
Final	Interne	515,8	345,4	0,089
	externe	590,8	378,6	0,088
	p	0,3011	0,4043	0,7325

Tableau 4 - Comparaison internes et externes.

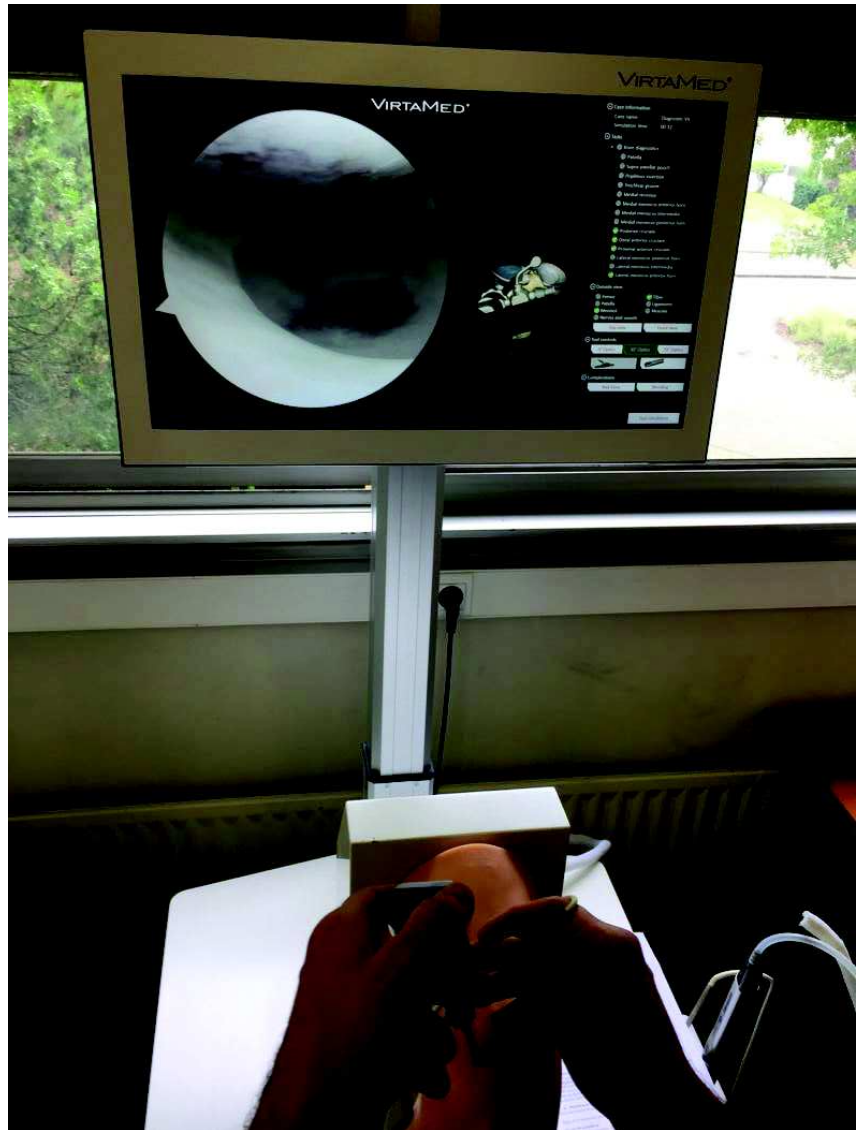


Figure 16 - Chondropathie fémoro-tibiale interne stade 4, souvent manquée par les étudiants.

DISCUSSION

Le programme de formation d'arthroscopie sur SRV mis en place dans notre étude a permis une amélioration statistiquement significative des performances pour chacun des trois exercices évalués. Le taux de satisfaction de la formation est élevé chez tous les participants : 4,6 / 5. L'étude n'a pas montré de différence significative entre internes et externes sur les niveaux de performances initiales, sur le delta des moyennes initiales et finales (ou courbe de progression) ainsi que sur les performances finales.

La *sécurité* est la progression qui paraît la plus importante, avec moins 25 % de dégâts en moyenne sur le cartilage.

La différence a surtout eu lieu dans le troisième exercice de l'évaluation (ménisectomie médiale) avec moins 42 %. C'est une procédure fréquente et particulièrement à risque pour le cartilage car la pince à ménisque doit passer sous le condyle fémoral médial : un espace restreint. C'est aussi le seul exercice où deux instruments sont utilisés en même temps (l'arthroscope et la pince à ménisque) ce qui double les risques de dégâts sur le cartilage. Cette amélioration de la sécurité va de pair avec l'augmentation de la précision de 46 % : les internes ont été plus précis, limitant les gestes superflus et donc les dégâts collatéraux. Ces progrès sont d'autant plus pertinents que l'arthroscopie, avec les progrès de l'imagerie, répond à des indications exclusivement thérapeutiques. Ces résultats confirment l'intérêt des SRV sur la diminution des erreurs, qui est prouvée dans la littérature (24)(25)(26)(27), en assurant des conditions de sécurité maximale au patient, comme mise en évidence dans le rapport de l'HAS (21).

Les deux autres exercices, à visée exclusivement diagnostique, ont surtout abouti à une importante augmentation de la *rapidité* (+ 55 % et + 66% respectivement) et une augmentation de la *précision* (- 47% et - 52%). Ces améliorations s'expliquent par l'apprentissage didactique du « tour » diagnostique standard lors de la première phase du programme, base de tous les exercices suivants, diagnostiques et thérapeutiques. Cet important nombre de répétitions se traduit par une économie conséquente de temps et de mouvements lors de l'évaluation finale. Ces progrès rejoignent les courbes de performances de Hodgins, où, sur plus de 340 arthroscopies, il rapporte un nombre moyen de 16 répétitions pour atteindre un certain niveau dans l'arthroscopie diagnostique du genou (14), ici largement dépassé.

L'absence de différence dans l'analyse de sous groupes a deux explications. L'effectif assez faible (n=17) ne donne probablement pas suffisamment de puissance à l'étude, et l'expérience des internes, avec une moyenne de 4,8 arthroscopies diagnostiques à leur actif, est finalement peu éloignée de celle des externes. Dans la littérature, ce simulateur a pourtant déjà montré sa validité de construction en faisant la différence entre novices et experts (84). L'absence de différence dans le delta des moyennes permet de penser que le programme est adapté aux

niveaux d'expérience des externes et des internes.

Dans les avantages notés on retrouve les progrès réalisés en anatomie cités librement par 7 étudiants et notamment 100 % des externes. En effet la simulation est un moyen d'apprendre ou d'approfondir l'anatomie chirurgicale. Ce mode d'apprentissage est très apprécié par les étudiants (75) et s'est avéré au moins aussi efficace qu'un livre d'anatomie selon Hariri (74).

La facilité d'accès (n=5) est un autre point fort du simulateur, permettant de pratiquer à volonté, à tout moment, en autonomie ; d'où l'importance de sa proximité avec les services du CHU.

La répétition a été spontanément rapportée comme un atout par uniquement trois internes. Elle représente pourtant un avantage considérable des SRV par rapport aux autres simulations (os secs, cadavres...) L'absence de consommables ou de logistique lourde autorise une répétition des exercices à l'infini et permet donc de compléter les courbes d'apprentissage longues qui caractérisent l'arthroscopie, décrites précédemment (14) et confirmées par Jackson sur les réparations méniscales (15).

Le retour d'information ou feedback, seulement cité par deux étudiants, est vu au sens large.

a) Le retour de sensation dit « *feed-back haptique* » (du grec « je touche ») est une notion primordiale pour les arthroscopistes. Même si le rôle d'aide opératoire est bénéfique pour les performances (91), il ne permet pas d'acquérir le sens du toucher et la gestuelle de précision que seul l'opérateur peut développer. Ce *feed-back haptique*, la déformation tissulaire (13) et la manipulation de membre, sont souvent retrouvées comme des notions capitales pour les simulateurs de réalité virtuelle (4).

b) Le retour d'information sur les performances de la procédure est également important ; il s'apparente ici à un débriefing. Dans la revue de la littérature de Issenberg (47), le feedback est référencé comme la caractéristique la plus importante et la plus citée (47%) dans les études.

Ces chiffres relativement faibles pour ces deux dernières notions s'expliquent à la fois par le caractère non suggéré des

commentaires et par la qualité du réalisme offert par le SRV. Il paraît évident qu'ils participent pourtant aux importants taux de satisfaction.

Dans les points faibles, deux étudiants ont noté la fragilité du matériel. Les SRV haute fidélité sont de véritables vitrines technologiques de haute précision ce qui les rend fragiles. Durant l'étude nous avons rencontré deux problèmes techniques : une panne de l'accéléromètre de la caméra ainsi qu'une fracture de fatigue de la patte de fixation du genou factice rendant le simulateur inutilisable durant les réparations (Figure 17).



Figure 17 - La fracture de fatigue de la fixation du genou factice témoin de la fragilité.

Deux autres participants ont pointé l'absence de considération des lésions cartilagineuses dans le tour diagnostique du genou : en effet, lors de la phase d'apprentissage, la visualisation de l'ensemble des surfaces cartilagineuses n'est pas obligatoire, alors qu'elle est pourtant un élément clé de l'arthroscopie diagnostique (Figure 16), ce qui a conduit à des sous-diagnostic durant l'entraînement.

Un étudiant a déploré l'absence de genou gauche : le simulateur actuel ne permet de s'exercer que du côté droit. Or sur un genou gauche, la palpation et le maniement des instruments fins se fait à main gauche : gestes plus difficiles pour les droitiers qui représentent 82 % de l'étude.

Les mesures des performances uniquement sur le simulateur sont une des limites de l'étude. En effet la preuve ultime d'efficacité d'une telle formation serait d'évaluer les internes directement sur de réelles arthroscopies : validation de transfert. Cette validité de transfert des SRV pour la pratique clinique de l'arthroscopie du genou est portée par deux essais randomisés contrôlés majeurs (87)(88). Le plus ancien est celui d'Howells, dans lequel un groupe entraîné sur simulateur a surpassé un groupe contrôle lors de d'une réelle arthroscopie diagnostique d'évaluation du genou (score de type check-list et un score GRS) (87). Dans un second essai randomisé contrôlé, Dilworth Cannon (88) a montré que les internes entraînés sur simulateur étaient significativement meilleurs sur les performances globales (score de check-list procédural) et les étapes de palpation lors d'une arthroscopie réelle. Les revues de la littératures considèrent donc cette validité de transfert comme acquise (4) (31) (80) (89).

Le faible effectif de participants fait également partie des faiblesses de l'étude. Ce paramètre pourrait expliquer l'absence de différences entre les internes et les externes.

L'aspect financier est une limite importante. Même si à terme ils pourraient être à l'origine d'économies, les simulateurs et leur entretien entraînent des dépenses immédiates importantes, leur prix d'achat dépasse fréquemment les cent mille euros : des sommes considérables, que seuls de gros centres de formation peuvent engager.

Le programme est adapté aux plus jeunes. Mais impose l'élaboration d'un programme de deuxième niveau basé sur les performances d'opérateurs expérimentés, destiné aux internes en fin de cursus, comme défendu dans le programme très abouti de Cannon (88).

Ceci ouvre également des perspectives pour la formation continue.

L'étude confirme l'intérêt d'un programme établi comme évoqué par le rapport sur la simulation en santé de l'HAS (21), qui cite le débriefing, la pratique répétée, la diversification des sources d'apprentissage, la réalisation de nombreux cas, comme des notions clés (47), que l'on retrouve également dans notre étude.

Un programme réalisé sur une base d'intervalles avec plusieurs sessions plus courtes a montré sa supériorité sur une

unique session intensive et longue (92) (15), tout comme la mise en place d'un examen final : ils augmentent les performances des étudiants selon Kromann (52).

D'autre part, des auteurs, tels que Issenberg (47) ou Gallagher (93), prônent l'intégration de la simulation dans un programme de formation de chirurgie à l'image du FLS (Fundamental Laparoscopique Surgery) (65) ou encore du KATS (Knee Arthroscopy Surgical Trainer) (46) établi par l'AAOS (l'American Academy Orthopedic Surgery) (31). En France, la réflexion de l'intégration de la simulation à l'enseignement du futur DES est une préoccupation importante et récente du Collège Français de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique Français.

Dans la liste des améliorations à apporter, la présence d'un formateur (n=6) a été spontanément citée. Ses bénéfices sont confirmés dans la littérature. Strandbygaard montre que pour deux groupes sans expérience la présence d'un instructeur divise par deux les temps opératoires avec des résultats plus homogènes (67). Le projet en cours dans notre centre est l'augmentation de la disponibilité d'un formateur pendant certaines sessions, afin de procurer les avantages de la présence d'un instructeur tout en respectant l'autonomie qu'offre le simulateur.



Figure 18 - Simulation d'une arthroscopie thérapeutique : ménissectomie médiale.

CONCLUSION

Les résultats de l'étude confirment le bien fondé de l'utilisation d'un SRV et du programme défini pour l'amélioration des performances des étudiants de faible expérience.

Ces résultats encourageants ouvrent des perspectives d'intégration de ce nouveau mode d'apprentissage, dans les différentes phases de formation, mais se heurtent pour l'instant au coût, à la disponibilité des simulateurs ainsi qu'au manque de programme. Ces problèmes pourraient être résolus dans le cadre d'une coopération inter universitaire et inter hospitalière, homogénéisant simultanément la formation au niveau régional.

3/ PROPOSITIONS

Ce travail n'est qu'un premier pas dans l'ère de la simulation. Beaucoup d'améliorations sont à apporter ; la plupart se basent sur les suggestions des internes qui sont capitales pour pouvoir offrir une formation adaptée aux besoins locaux et sur la bibliographie rassemblée pour cette étude.

La liste ci dessous est non exhaustive, elle présente des pistes de réflexion pour progresser ensemble, installer un peu plus la simulation dans le cursus des internes de chirurgie orthopédique de Bordeaux et peut être devenir un site de référence.

1) La mise en place d'un formateur, autre qu'un interne, peut être un chef de clinique ou un permanent universitaire. C'est une étape clé dans le développement du programme. Dans l'idéal, il pourrait suivre une formation de DU ou DIU. Il pourrait intervenir lors d'une permanence un jour par semaine par exemple, dispensant ainsi des conseils personnalisés aux internes tout en préservant le mode d'apprentissage autonome du simulateur pour en favoriser l'accès et les sessions.

2) Rendre le programme obligatoire pour les internes en stage au CHU. L'intégrer à l'emploi du temps des internes favoriserait l'utilisation du simulateur avec l'aménagement de plages horaires incluant également la permanence de l'instructeur.

Conformément au « Guide de simulation chirurgicale à

l'usage des coordonnateurs du DES d'orthopédie et traumatologie » d'août 2017, ce programme avec son extension à l'épaule permettrait aux internes de la « phase socle » de remplir les objectifs fixés par le Collège, immédiatement, dès la mise en place de la réforme. Tout d'abord « La maîtrise du fore oblique (exercice : Telescoping) » se ferait grâce au module basique. Ensuite les internes pourraient réaliser les programmes pour le « contrôle d'objet cible (exercice Catch the stars Shoulder) » et « la conduite d'une exploration articulaire (exercice Unknow pathology Knee) » tout en y ajoutant l'apprentissage de l'anatomie chirurgicale. La réalisation des deux programmes bordelais (du genou et de l'épaule) permettrait de remplir et même de dépasser les objectifs fixés par le collège (trois heures de pratique selon le Guide).

3) Etendre le programme aux autres articulations. Le programme de l'épaule est déjà créé dans l'ArthroS sur le même mode, on pourrait rendre le programme obligatoire pour les internes du CHU.

4) Mettre en place une session sur cadavre tous les six mois (laboratoire d'anatomie, Camion mobile). Cette session pourrait avoir lieu en fin de semestre après avoir complété le programme du simulateur sur le genou et l'épaule pour que les internes puissent en tirer le maximum d'enseignement. Elle serait ouverte à tous les internes ayant complété la formation sur simulateur de réalité virtuelle. Cet ensemble permettrait de construire un programme complet de formation à l'arthroscopie, et de motiver les internes à la pratique du simulateur. Cette suggestion fait également partie du « Guide de simulation chirurgicale à l'usage des coordonnateurs du DES d'orthopédie et traumatologie » transmis par le collège Français de chirurgie orthopédique et traumatologique.

5) Renforcer le partenariat avec le constructeur Virtamed. La proposition d'un centre test a été faite. L'acquisition de nouveaux modules (hanche et cheville) est envisagée ; avec élaboration future de nouveaux programmes (en collaboration avec le Centre du pied : CMUP ?). Ce renfort de partenariat pourrait nous aider à acquérir de nouveaux simulateurs.

6) Favoriser les autres modes de simulations, notamment sur les os secs. Activités pour lesquelles ses sociétés commerciales sont demandeuses de collaboration.

7) Participer à la concrétisation de l'école de chirurgie par l'individualisation d'un véritable Laboratoire Minimal de Simulation (ou LMS) tel qu'il est décrit dans le « guide de simulation chirurgicale à l'usage des coordonnateurs du DES d'orthopédie et traumatologie » pour la mise en place de l'enseignement de la « phase socle » de la réforme du cursus de chirurgie. Ce laboratoire pourrait offrir un condensé des différentes simulations, offrant ainsi un espace de travail convivial aux internes.

4/ CONCLUSION

La France et l'orthopédie sont en retard dans le monde de la formation par simulation notamment celui de la réalité virtuelle. Pourtant ce formidable moyen d'entraînement fait l'objet de nombreux travaux. Ceci incite à poursuivre les efforts engagés pour intégrer au mieux la simulation dans le cursus de formation des internes en chirurgie ce qui permettra, à terme, d'améliorer et d'homogénéiser leurs performances, tout en diminuant les coûts de ce long apprentissage, tout en améliorant significativement la sécurité des patients.

5/ BIBLIOGRAPHIE

1. SFA. Arthroscopie 2e édition. In: Arthroscopie 2e édition. p. 5.
2. Takagi K. The classic. Arthroscope. Kenji Takagi. J. Jap. Orthop. Assoc., 1939. Clin Orthop. 1982 Jul;(167):6-8.
3. Watanabe M. Memories of the early days of arthroscopy. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. 1986;2(4):209-14.
4. Madan SS, Pai DR. Role of simulation in arthroscopy training. Simul Healthc J Soc Simul Healthc. 2014 Apr;9(2):127-35.
5. Jackson RW, Abe I. The role of arthroscopy in the management of disorders of the knee. An analysis of 200 consecutive examinations. J Bone Joint Surg Br. 1972 May;54(2):310-22.
6. Casscells SW. Arthroscopy of the knee joint. A review of 150 cases. J Bone Joint Surg Am. 1971 Mar;53(2):287-98.
7. O'Connor RL. Arthroscopy. Lippincott. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins,; 1977.
8. Simulation en santé. In: Wikipédia [Internet]. 2017 [cited 2017 Jul 9]. Available from: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Simulation_en_sant%C3%A9&oldid=138051521
9. Meyer RD, Tamarapalli JR, Lemons JE. Arthroscopy training using a 'black box' technique. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. 1993;9(3):338-40.
10. Ziegler R, Fischer G, Müller W, Göbel M. Virtual reality arthroscopy training simulator. Comput Biol Med. 1995 Mar;25(2):193-203.
11. McCarthy AD, Hollands RJ. A commercially viable virtual reality knee arthroscopy training system. Stud Health Technol Inform. 1998;50:302-8.
12. Vankipuram M, Kahol K, McLaren A, Panchanathan S. A virtual reality simulator for orthopedic basic skills: a design and validation study. J Biomed Inform. 2010 Oct;43(5):661-8.
13. Gibson, Ron, Andrew, Christina, Eric, Takeo, et al. Simulating arthroscopic knee surgery using volumetric object representations, real-time volume rendering and haptic feedback. [Internet]. [cited 2017 May 29]. Available from: <http://sci-hub.bz/10.1007/bfb0029258>
14. Hodgins JL, Veillette C, Biau D, Sonnadara R. The knee arthroscopy learning curve: quantitative assessment of surgical skills. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. 2014 May;30(5):613-21.
15. Jackson WFM, Khan T, Alvand A, Al-Ali S, Gill HS, Price AJ, et al. Learning and retaining simulated arthroscopic meniscal repair skills. J Bone Joint Surg Am. 2012 Sep 5;94(17):e132.
16. Hall MP, Kaplan KM, Gorczynski CT, Zuckerman JD, Rosen JE. Assessment of arthroscopic training in U.S. orthopedic surgery residency programs--a resident self-assessment. Bull NYU Hosp Jt Dis. 2010;68(1):5-10.
17. Alvand A, Auplish S, Gill H, Rees J. Innate arthroscopic skills in medical students and variation in learning curves. J Bone Joint Surg Am. 2011 Oct 5;93(19):e115(1-9).
18. Temps de travail des internes : circulaire interministérielle du 29 octobre 2015 - Fédération

Hospitalière de France (FHF) [Internet]. [cited 2017 Jul 11]. Available from: <https://www.fhf.fr/Ressources-humaines/Gestion-du-personnel-medical/Temps-de-travail-des-internes-circulaire-interministerielle-du-29-octobre-2015>

19. Harris JD, Staheli G, LeClere L, Andersone D, McCormick F. What effects have resident work-hour changes had on education, quality of life, and safety? A systematic review. *Clin Orthop*. 2015 May;473(5):1600-8.
20. Egan C, Elliott R, Fleming P. European Working Time Directive and the use of simulators and models in Irish orthopaedics. *Ir J Med Sci*. 2012 Mar 1;181(1):143-6.
21. Rapport - simulation_en_sante_-_rapport.pdf [Internet]. [cited 2017 Jul 11]. Available from: https://www.has-sante.fr//portail/upload/docs/application/pdf/2012-01/simulation_en_sante_-_rapport.pdf
22. Role of Simulation in Arthroscopy Training : Simulation in Healthcare [Internet]. LWW. [cited 2017 Apr 2]. Available from: http://journals.lww.com/simulationinhealthcare/Fulltext/2014/04000/Role_of_Simulation_in_Arthroscopy_Training.8.aspx
23. Stefanidis D, Scerbo MW, Montero PN, Acker CE, Smith WD. Simulator training to automaticity leads to improved skill transfer compared with traditional proficiency-based training: a randomized controlled trial. *Ann Surg*. 2012 Jan;255(1):30-7.
24. Fried M, Satava R, Weghorst S, Gallagher A, Sasaki C, Ross D, et al. Identifying and reducing errors with surgical simulation. *Qual Saf Health Care*. 2004 Oct;13(Suppl 1):i19-26.
25. Fried MP, Satava R, Weghorst S, Gallagher A, Sasaki C, Ross D, et al. The Use of Surgical Simulators to Reduce Errors. In: Henriksen K, Battles JB, Marks ES, Lewin DI, editors. *Advances in Patient Safety: From Research to Implementation (Volume 4: Programs, Tools, and Products)* [Internet]. Rockville (MD): Agency for Healthcare Research and Quality (US); 2005 [cited 2017 Mar 28]. (Advances in Patient Safety). Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK20604/>
26. Daniel J. Scott, MD, FACS. Patient Safety, Competency, and the Future of Surgical Simulation [Internet]. [cited 2017 Apr 2]. Available from: <http://sci-hub.ac/10.1097/01.sih.0000244453.20671.f2>
27. Ahlberg G, Enochsson L, Gallagher AG, Hedman L, Hogman C, McClusky III DA, et al. Proficiency-based virtual reality training significantly reduces the error rate for residents during their first 10 laparoscopic cholecystectomies. *Am J Surg*. 2007 juin;193(6):797-804.
28. Farnworth LR, Lemay DE, Wooldridge T, Mabrey JD, Blaschak MJ, DeCoster TA, et al. A comparison of operative times in arthroscopic ACL reconstruction between orthopaedic faculty and residents: the financial impact of orthopaedic surgical training in the operating room. *Iowa Orthop J*. 2001;21:31-5.
29. Satava RM. Virtual reality surgical simulator: the first steps. 1993. *Clin Orthop*. 2006 Jan;442:2-4.
30. Aggarwal R, Darzi A. Technical-Skills Training in the 21st Century. *N Engl J Med*. 2006 décembre;355(25):2695-6.
31. Kivanc Atesok. Surgical Simulation in Orthopaedic Skills Training (JAAOS) [Internet]. [cited

2017 Apr 2]. Available from: <http://sci-hub.bz/10.5435/jaaos-20-07-410>

32. Alaker M, Wynn GR, Arulampalam T. Virtual reality training in laparoscopic surgery: A systematic review & meta-analysis. *Int J Surg Lond Engl*. 2016 May;29:85-94.
33. Patil V, Odak S, Chian V, Chougale A. Use of Webcam as Arthroscopic Training Model for Junior Surgical Trainees. *Ann R Coll Surg Engl*. 2009 Mar;91(2):161-2.
34. van Merriënboer JJG, Sweller J. Cognitive load theory in health professional education: design principles and strategies. *Med Educ*. 2010 Jan;44(1):85-93.
35. Hetaimish BM. Sawbones laboratory in orthopedic surgical training. *Saudi Med J*. 2016 Apr;37(4):348-53.
36. Egol KA, Phillips D, Vongbandith T, Szyld D, Strauss EJ. Do orthopaedic fracture skills courses improve resident performance? *Injury*. 2015 Apr;46(4):547-51.
37. Butler A, Olson T, Koehler R, Nicandri G. Do the skills acquired by novice surgeons using anatomic dry models transfer effectively to the task of diagnostic knee arthroscopy performed on cadaveric specimens? *J Bone Joint Surg Am*. 2013 Feb 6;95(3):e15(1-8).
38. Gilbody J, Prasthofer AW, Ho K, Costa ML. The use and effectiveness of cadaveric workshops in higher surgical training: a systematic review. *Ann R Coll Surg Engl*. 2011 Jul;93(5):347-52.
39. Grechenig W, Fellingner M, Fankhauser F, Weiglein AH. The Graz learning and training model for arthroscopic surgery. *Surg Radiol Anat SRA*. 1999;21(5):347-50. Grechenig W, Fellingner M, Fankhauser F, Weiglein AH. The Graz learning and training model for arthroscopic surgery. *Surg Radiol Anat SRA*. 1999;21(5):347-50.
40. Blaschko SD, Brooks HM, Dhuy SM, Charest-Shell C, Clayman RV, McDougall EM. Coordinated multiple cadaver use for minimally invasive surgical training. *JLS*. 2007 Dec;11(4):403-7.
41. Unalan PC, Akan K, Orhun H, Akgun U, Poyanli O, Baykan A, et al. A basic arthroscopy course based on motor skill training. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA*. 2010 Oct;18(10):1395-9.
42. Fadero PE, Shah M. Three dimensional (3D) modelling and surgical planning in trauma and orthopaedics. *The Surgeon*. 2014 décembre;12(6):328-33.
43. Jiménez-Delgado JJ, Paulano-Godino F, PulidoRam-Ramírez R, Jiménez-Pérez JR. Computer assisted preoperative planning of bone fracture reduction: Simulation techniques and new trends. *Med Image Anal*. 2016 mai;30:30-45.
44. The Effect of Computer Navigation on Trainee Learning of Sur... : *JBSJ* [Internet]. LWW. [cited 2017 May 1]. Available from: http://journals.lww.com/jbjsjournal/Fulltext/2007/12000/The_Effect_of_Computer_Navigation_on_Trainee.31.aspx
45. Gallagher AG, Ritter EM, Champion H, Higgins G, Fried MP, Moses G, et al. Virtual reality simulation for the operating room: proficiency-based training as a paradigm shift in surgical skills training. *Ann Surg*. 2005 Feb;241(2):364-72.
46. Mabrey JD, Reinig KD, Cannon WD. Virtual Reality in Orthopaedics: Is It a Reality? *Clin Orthop*. 2010 Oct;468(10):2586-91.
47. Issenberg SB, McGaghie WC, Petrusa ER, Lee Gordon D, Scalese RJ. Features and uses of

high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: a BEME systematic review. *Med Teach*. 2005 Jan;27(1):10-28.

48. Pearson AM, Gallagher AG, Rosser JC, Satava RM. Evaluation of structured and quantitative training methods for teaching intracorporeal knot tying. *Surg Endosc*. 2002 Jan;16(1):130-7.
49. Chang L, Petros J, Hess DT, Rotondi C, Babineau TJ. Integrating simulation into a surgical residency program: is voluntary participation effective? *Surg Endosc*. 2007 Mar; 21(3):418-21.
50. Karam MD, Pedowitz RA, Natividad H, Murray J, Marsh JL. Current and future use of surgical skills training laboratories in orthopaedic resident education: a national survey. *J Bone Joint Surg Am*. 2013 Jan 2;95(1):e4.
51. Howells NR, Auplish S, Hand GC, Gill HS, Carr AJ, Rees JL. Retention of arthroscopic shoulder skills learned with use of a simulator. Demonstration of a learning curve and loss of performance level after a time delay. *J Bone Joint Surg Am*. 2009 May;91(5):1207-13.
52. Kromann CB, Jensen ML, Ringsted C. The effect of testing on skills learning. *Med Educ*. 2009 Jan;43(1):21-7.
53. Jacobsen ME, Andersen MJ, Hansen CO, Konge L. Testing basic competency in knee arthroscopy using a virtual reality simulator: exploring validity and reliability. *J Bone Joint Surg Am*. 2015 May 6;97(9):775-81.
54. Koehler RJ, Nicandri GT. Using the Arthroscopic Surgery Skill Evaluation Tool as a Pass-Fail Examination. *J Bone Joint Surg Am*. 2013 Dec 4;95(23):e187.
55. Koehler RJ, Amsdell S, Arendt EA, Bisson LJ, Braman JP, Braman JP, et al. The Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool (ASSET). *Am J Sports Med*. 2013 Jun;41(6):1229-37.
56. Bayona S, Akhtar K, Gupte C, Emery RJH, Dodds AL, Bello F. Assessing Performance in Shoulder Arthroscopy: The Imperial Global Arthroscopy Rating Scale (IGARS). *J Bone Joint Surg Am*. 2014 Jul 2;96(13):e112.
57. Middleton RM, Baldwin MJ, Akhtar K, Alvand A, Rees JL. Which Global Rating Scale? A Comparison of the ASSET, BAKSSS, and IGARS for the Assessment of Simulated Arthroscopic Skills. *J Bone Joint Surg Am*. 2016 Jan 6;98(1):75-81.
58. Modi CS, Morris G, Mukherjee R. Computer-simulation training for knee and shoulder arthroscopic surgery. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc*. 2010 Jun;26(6):832-40.
59. Howells NR, Brinsden MD, Gill RS, Carr AJ, Rees JL. Motion Analysis: A Validated Method for Showing Skill Levels in Arthroscopy. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg*. 2008 Mar;24(3):335-42.
60. Andersen C, Winding TN, Vesterby MS. Development of simulated arthroscopic skills. *Acta Orthop*. 2011 Feb;82(1):90-5.
61. Tuijthof GJM, Visser P, Sierevelt IN, Van Dijk CN, Kerkhoffs GMMJ. Does Perception of Usefulness of Arthroscopic Simulators Differ with Levels of Experience? *Clin Orthop*. 2011 Jun;469(6):1701-8.
62. Fucentese SF, Rahm S, Wieser K, Spillmann J, Harders M, Koch PP. Evaluation of a virtual-reality-based simulator using passive haptic feedback for knee arthroscopy. *Knee*

- Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2015 Apr 1;23(4):1077-85.
63. McCarthy AD, Moody L, Waterworth AR, Bickerstaff DR. Passive haptics in a knee arthroscopy simulator: is it valid for core skills training? Clin Orthop. 2006 Jan;442:13-20.
 64. Bashankaev B, Baido S, Wexner SD. Review of available methods of simulation training to facilitate surgical education. Surg Endosc. 2011 Jan 1;25(1):28-35.
 65. Daniel J. Scott, Gary L. Dunnington. The New ACS/APDS Skills Curriculum: Moving the Learning Curve Out of the Operating Room [Internet]. [cited 2017 Apr 2]. Available from: <http://sci-hub.bz/10.1007/s11605-007-0357-y>
 66. Balfagon S. Devenir formateur en simulation ça ne s'invente pas. What's up doc? 2017 Jan;(30):34-5.
 67. Strandbygaard J, Bjerrum F, Maagaard M, Winkel P, Larsen CR, Ringsted C, et al. Instructor feedback versus no instructor feedback on performance in a laparoscopic virtual reality simulator: a randomized trial. Ann Surg. 2013 May;257(5):839-44.
 68. Porte MC, Xeroulis G, Reznick RK, Dubrowski A. Verbal feedback from an expert is more effective than self-accessed feedback about motion efficiency in learning new surgical skills. Am J Surg. 2007 Jan;193(1):105-10.
 69. Reznick RK, MacRae H. Teaching surgical skills--changes in the wind. N Engl J Med. 2006 Dec 21;355(25):2664-9.
 70. Role of Simulation in Arthroscopy Training : Simulation in Healthcare [Internet]. LWW. [cited 2017 Apr 2]. Available from: http://journals.lww.com/simulationinhealthcare/Fulltext/2014/04000/Role_of_Simulation_in_Arthroscopy_Training.8.aspx
 71. Blyth P, Anderson IA, Stott NS. Virtual reality simulators in orthopedic surgery: what do the surgeons think? J Surg Res. 2006 Mar;131(1):133-139; discussion 140-142.
 72. Rosser JC, Lynch PJ, Cuddihy L, Gentile DA, Klonsky J, Merrell R. The impact of video games on training surgeons in the 21st century. Arch Surg Chic Ill 1960. 2007 Feb;142(2):181-186; discussion 186.
 73. Ou Y, McGlone ER, Camm CF, Khan OA. Does playing video games improve laparoscopic skills? Int J Surg Lond Engl. 2013;11(5):365-9.
 74. Hariri S, Rawn C, Srivastava S, Youngblood P, Ladd A. Evaluation of a surgical simulator for learning clinical anatomy. Med Educ. 2004 Aug;38(8):896-902.
 75. Knobe M, Carow JB, Ruesseler M, Leu BM, Simon M, Beckers SK, et al. Arthroscopy or ultra sound in undergraduate anatomy education: a randomized cross-over controlled trial. BMC Med Educ. 2012 Sep 9;12:85.
 76. Nagendran M, Gurusamy KS, Aggarwal R, Loizidou M, Davidson BR. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. Cochrane Database Syst Rev. 2013 Aug 27;(8):CD006575.
 77. Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen DK, et al. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. Ann Surg. 2002 Oct;236(4):458-463; discussion 463-464.
 78. Gallagher AG, Ritter EM, Champion H, Higgins G, Fried MP, Moses G, et al. Virtual reality

simulation for the operating room: proficiency-based training as a paradigm shift in surgical skills training. *Ann Surg*. 2005 Feb;241(2):364-72.

79. Gurusamy K, Aggarwal R, Palanivelu L, Davidson BR. Systematic review of randomized controlled trials on the effectiveness of virtual reality training for laparoscopic surgery. *Br J Surg*. 2008 Sep;95(9):1088-97.
80. Slade Shantz JA, Leiter JRS, Gottschalk T, MacDonald PB. The internal validity of arthroscopic simulators and their effectiveness in arthroscopic education. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA*. 2014 Jan;22(1):33-40.
81. Tuijthof GJM, van Sterkenburg MN, Sierevelt IN, van Oldenrijk J, Van Dijk CN, Kerkhoffs GMMJ. First validation of the PASSPORT training environment for arthroscopic skills. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA*. 2010 Feb;18(2):218-24.
82. Bliss JP, Hanner-Bailey HS, Scerbo MW. Determining the efficacy of an immersive trainer for arthroscopy skills. *Stud Health Technol Inform*. 2005;111:54-6.
83. Cannon WD, Nicandri GT, Reinig K, Mevis H, Wittstein J. Evaluation of skill level between trainees and community orthopaedic surgeons using a virtual reality arthroscopic knee simulator. *J Bone Joint Surg Am*. 2014 Apr 2;96(7):e57.
84. Garfjeld Roberts P, Guyver P, Baldwin M, Akhtar K, Alvand A, Price AJ, et al. Validation of the updated ArthroS simulator: face and construct validity of a passive haptic virtual reality simulator with novel performance metrics. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA*. 2017 Feb;25(2):616-25.
85. Martin KD, Akoh CC, Amendola A, Phisitkul P. Comparison of Three Virtual Reality Arthroscopic Simulators as Part of an Orthopedic Residency Educational Curriculum. *Iowa Orthop J*. 2016;36:20-5.
86. Rebolledo BJ, Hammann-Scala J, Leali A, Ranawat AS. Arthroscopy skills development with a surgical simulator: a comparative study in orthopaedic surgery residents. *Am J Sports Med*. 2015 Jun;43(6):1526-9.
87. Howells NR, Gill HS, Carr AJ, Price AJ, Rees JL. Transferring simulated arthroscopic skills to the operating theatre. *Bone Jt J*. 2008 Apr 1;90-B(4):494-9.
88. Cannon WD, Garrett WE, Hunter RE, Sweeney HJ, Eckhoff DG, Nicandri GT, et al. Improving residency training in arthroscopic knee surgery with use of a virtual-reality simulator. A randomized blinded study. *J Bone Joint Surg Am*. 2014 Nov 5;96(21):1798-806.
89. Tay C, Khajuria A, Gupte C. Simulation training: A systematic review of simulation in arthroscopy and proposal of a new competency-based training framework. *Int J Surg*. 2014 juin;12(6):626-33.
90. Koehler RJ, Goldblatt JP, Maloney MD, Voloshin I, Nicandri GT. Assessing Diagnostic Arthroscopy Performance in the Operating Room Using the Arthroscopic Surgery Skill Evaluation Tool (ASSET). *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc*. 2015 Dec;31(12):2314-2319.e2.
91. LeBel M-E, Haverstock J, Cristancho S, van Eimeren L, Buckingham G. Observational Learning During Simulation-Based Training in Arthroscopy: Is It Useful to Novices? *J Surg*

Educ. 2017 Jun 23;

92. Moulton C-AE, Dubrowski A, Macrae H, Graham B, Grober E, Reznick R. Teaching surgical skills: what kind of practice makes perfect?: a randomized, controlled trial. *Ann Surg.* 2006 Sep;244(3):400-9.
93. Gallagher AG, Ritter EM, Satava RM. Fundamental principles of validation, and reliability: rigorous science for the assessment of surgical education and training. *Surg Endosc Interv Tech.* 2003 Oct 1;17(10):1525-9.

